

# UMSCHLAGDECKEL

Campus 360 GmbH

Endbericht des Forschungsprojektes

Az: 32312/02 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Prozessbegleitende Planung, Umsetzung, Monitoring und Dokumentation eines ressourcenneutralen Neubaus:

die Alnatura-Arbeitswelt in Darmstadt

Dezember 2021

# TITELBLATT

**PROJEKTKENNBLETT**

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>32312/02</b>	Referat	<b>25</b>	Fördersumme	<b>452.134 €</b>
<b>Antragstitel</b>					
<b>Prozessbegleitende Planung, Umsetzung, Monitoring und Dokumentation eines ressourcenneutralen Neubaus: die Alnatura-Arbeitswelt in Darmstadt</b>					
<b>Stichworte</b>					
<b>Laufzeit</b>		Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>4 Jahre</b>		<b>24.03.2016</b>	<b>23.03.2020</b>	<b>2</b>	
<b>Zwischenberichte</b>					
<b>Bewilligungsempfänger</b>		Campus 360 GmbH Alexander Link Darmstädterstr. 63 64404 Bickenbach		Tel 06257-9322-355 Fax 06257-9322-8355	
				Projektleitung Alexander Link	
				Bearbeiter Christiane Meyer	
<b>Kooperationspartner</b>		TU München Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen Prof. Thomas Auer Arcisstr. 21, 80333 München  Haas Cook Zemmrich – STUDIO2050 Martin Haas Gymnasiumstr. 56, 70174 Stuttgart  Transsolar Christian Frenzel Curiestr. 2, 70563 Stuttgart  Lehm Ton Erde Martin Rauch Quadernstr.7, 6824 Schlins, Österreich			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

## **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Ziel des Forschungsprojektes ist es die im interdisziplinären Planungsprozess ausgewählten Lösungen sowohl in einem gebauten Projekt als auch in dessen Realisierungsprozess zu evaluieren. Der Innovationscharakter dieses Forschungsvorhaben besteht darin, einerseits den Herstellungsprozess der Bauteile – insbesondere der Stampflehmwände - aufzuzeichnen und hinsichtlich des tatsächlichen Energieaufwandes zu bewerten, andererseits sollen durch die Messung der Betriebsenergie des gebauten Projektes Rückschlüsse über die gewählten Technologien formuliert werden.

Dadurch soll der gesamte Vorgang, von der Entwurfsplanung bis hin zur Realisierung, aufgenommen und hinsichtlich des Ressourcenaufwandes bewertet werden. Die Entscheidungen die in dem integralen Planungsprozess gefallen sind sollen auf ihre Auswirkungen auf die Realisierungsphase evaluiert und validiert werden. Hiermit soll die Effektivität der einzelnen Lösungen in ihrem Herstellungsprozess und deren Funktion als Elemente eines Gebäudes, das mit einem Minimum an Energie ein Maximum an Aufenthaltsqualität schafft, evaluiert werden.

Basierend auf die durch Simulationen erstellten Prognosen zum Innenraumlima soll durch eine zweijährige Monitoringkampagne die Effektivität der Kombination aus Bauteilen und Anlagen-technik überprüft werden.

Ein Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den erfassten Daten soll zu einer Optimierung des Gebäudebetriebes dienen um sich den Anforderungen der Nutzer effizienter anpassen zu können, und um den Grad der Ressourcenneutralität zu eruieren.

In einer abschließenden Dokumentation sollen die umgesetzten Kenntnisse publiziert und verbreitet werden.

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Das vorliegende Forschungsprojekt wurde in zwei voneinander unabhängige Phasen gegliedert. Im Rahmen der Projektphase 1 soll das Realisierungsprozess dieses innovativen Bauvorhabens wissenschaftlich begleitet werden, daran anknüpfend soll in der Phase 2 das Gebäude im Betrieb – durch ein zweijähriges Monitoring – auf die angestrebten Ziele überprüft werden. Die Kombination der zwei Phasen würde es ermöglichen, den integralen Planungs- und Realisierungsprozesses der „Alnatura-Arbeitswelt“ auf den gesamtenergetischen Aufwand, in der Realisierung und im Betrieb auf Ressourcenneutralität zu überprüfen und damit die Erkenntnisse dieser Methodik auf andere Fälle übertragbar zu machen.

Phase 1

Begleitung Umsetzung mit Bewertung der Prozesse

Bewertung der ausgewählten konstruktiven Lösungen in Bezug auf den Energetischen Aufwand; Aufnahme und Analyse der einzelnen Prozessphasen; Erstellung einer Datenbank für die graue Energie von Stampflehm und anderer Bauteile in der Herstellung und Implementierung

Phase 2

Monitoring, Betriebsoptimierung und Abschlussdokumentation

Datenerfassung zu Raumklima und bauphysikalischen Eigenschaften von Stampflehm; Vergleich der durch Simulation erwarteten Ergebnisse mit aufgefassten Daten; Optimierung des Betriebes; Zusammenfassung der Ergebnisse und Erarbeitung allgemeiner Aussagen zu Strategien und Prozessen. Publikation und Öffentlichkeitsarbeit.

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>6</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>15</b>
<b>ABKÜRZUNGEN UND BEGRIFFSERKLÄRUNGEN</b> .....	<b>17</b>
<b>ANTRAGSTELLER UND KOOPERATIONSPARTNER</b> .....	<b>18</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>22</b>
<b>1. EINLEITUNG: ZUKUNFTSFÄHIGES GEWERBE</b> .....	<b>23</b>
<b>2. AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG: INNOVATIVER CHARAKTER UND UMWELTRELEVANZ</b> .....	<b>27</b>
2.1    ARBEITSPLAN UND DARSTELLUNG DES LÖSUNGSWEGES.....	27
2.2    BEWERTUNG DER HERSTELLUNGS- UND ERRICHTUNGSPHASE .....	28
2.3    ANFORDERUNGEN AN DAS MONITORING.....	29
<b>3. VORSTELLUNG BAUPROJEKT „ALNATURA-ARBEITSWELT“</b> .....	<b>32</b>
3.1    GEBÄUDEKUBATUR UND -HÜLLE .....	35
3.2    TRAGWERK UND KONSTRUKTION .....	37
3.3    AKUSTIK.....	39
3.4    BRANDSCHUTZ .....	40
3.5    ENERGIEKONZEPT .....	40
3.5.1 <i>Lüftung</i> .....	40
3.5.2 <i>Heizung</i> .....	43
3.5.3 <i>Wärme- und Kälteversorgung</i> .....	44
<b>4. PHASE 1: BEGLEITUNG DER UMSETZUNG MIT BEWERTUNG DER PROZESSE</b> .....	<b>46</b>
4.1    INTEGRALER PLANUNGSPROZESS.....	46
4.1.1 <i>Anforderung Fassade</i> .....	47
4.1.2 <i>Anforderung Sonnenschutz</i> .....	50
4.1.3 <i>Anforderung Kunstlicht</i> .....	53
4.1.4 <i>Anforderung Lüftung</i> .....	55
4.1.5 <i>Anforderung Wandheizung</i> .....	58
4.1.6 <i>Anforderung technische Gebäudeausrüstung</i> .....	63
4.1.7 <i>Anforderung Energieerzeugung</i> .....	64
4.1.8 <i>Anforderung Mess-, Steuer- und Regelungstechnik</i> .....	68
4.2    METHODE DER LEBENSZYKLUSANALYSE .....	76
4.2.1 <i>Begriffsdefinition Ressourcenneutralität</i> .....	83
4.2.2 <i>Beschreibung Lebenszyklusanalyse und graue Energie</i> .....	90

4.2.3	<i>Evaluationsmatrix für Material- und Produktentscheidungen am Beispiel Dämmstoff</i> .....	95
4.3	ANALYSE DER UMSETZUNG AM BEISPIEL DER STAMPFLEHMWÄNDE .....	100
4.3.1	<i>Beschreibung des Materials Lehm und der Materialzusammensetzung</i> .....	100
4.3.2	<i>Stoffwerte, Genehmigungen und Prüfverfahren</i> .....	103
4.3.3	<i>Produktionsabläufe, Infrastruktur und Maschineneinsatz</i> .....	104
4.3.4	<i>Datenerfassung Rohstoffgewinnung Modul A1</i> .....	106
4.3.5	<i>Datenerfassung Messkonzept A2-A5</i> .....	106
4.3.6	<i>Bewertung der grauen Energie</i> .....	109
4.3.7	<i>Bewertungsmatrix/Evaluation</i> .....	114
<b>5.</b>	<b>PHASE 2: MONITORING, GEBÄUEBETRIEBS UND OPTIMIERUNG</b> .....	<b>115</b>
5.1	MONITORING .....	115
5.1.1	<i>Konzept</i> .....	115
5.1.2	<i>Abgleich Messdaten</i> .....	122
5.1.3	<i>Analyse des thermischen Komforts</i> .....	132
5.1.4	<i>Analyse des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung</i> .....	144
5.2	KURZZEITMESSUNGEN .....	152
5.2.1	<i>Luftgeschwindigkeit an den Auslässen</i> .....	152
5.2.2	<i>Kaltluftabfall an Oberlichter</i> .....	166
5.3	NUTZERZUFRIEDENHEIT UND BEHAGLICHKEIT .....	176
5.3.1	<i>Umfrage zur Behaglichkeit</i> .....	177
5.3.2	<i>Auswirkungen auf die Aufenthaltsqualität</i> .....	177
5.3.3	<i>Auswirkungen auf das Raumklima</i> .....	178
5.3.4	<i>Langlebigkeit dank Veränderbarkeit</i> .....	178
5.3.5	<i>Architektonischer Ausdruck</i> .....	179
	<b>ERGEBNISSE UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN</b> .....	<b>180</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>181</b>
	<b>ANHANG PLÄNE</b> .....	<b>A</b>
	ANHANG P1 .....	I
	ANHANG P2 .....	II
	ANHANG P3 .....	III

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageplan .....	33
Abbildung 2: Grundriss EG .....	34
Abbildung 3: Grundriss 1. OG .....	34
Abbildung 4: Grundriss 2. OG .....	34
Abbildung 5: Alnatura-Arbeitswelt, W-Ansicht; Quelle: The Pk. Odessa Co. ....	36
Abbildung 6: Blick ins Atrium nach Westen; Quelle: The Pk. Odessa Co. ....	37
Abbildung 7: Errichtungsphase, zweischalige gedämmte Lehmelemente, thermisch aktivierte Innenraumkonstruktion, Holzdach aus Leimbindern; Quelle: Marc Doradzillo .....	39
Abbildung 8: Erdkanalsystem in Lageplan und Schnitt.....	41
Abbildung 9: Erdkanäle.....	41
Abbildung 10: Lüftungszentrale; Quelle: The Pk. Odessa Co.....	43
Abbildung 11: Lehmwand während der Bauphase (links), Lehmwand thermische Aktivierung innen (rechts); Quelle: <a href="http://www.transsolar.com">www.transsolar.com</a> .....	43
Abbildung 12: Lehmwand nach Fertigstellung (links), Lehmfassade während Bauphase (rechts); Quelle: <a href="http://www.transsolar.com">www.transsolar.com</a> .....	44
Abbildung 13: Jahresdauerlinie für Heizung und Kühlung mit Abbildung der Wärmeerzeuger .....	45
Abbildung 14: Heizzentrale; Quelle: The Pk. Odessa Co. ....	45
Abbildung 15: Visualisierung des iterativen integralen Entscheidungsprozesses im Zusammenspiel der beiden Forschungsprojekte Alnatura I und II .....	46
Abbildung 16: Verortung der Verglasungen in Dach und Fassaden .....	49
Abbildung 17: Belegungsanteil Südwestfassade.....	51
Abbildung 18: Steuerschema motorisch gesteuerter Sonnenschutz (außen) .....	52

Abbildung 19: Steuerschema Kunstlichtbetrieb.....	54
Abbildung 20: Thermische Masse verschiedener Bauteile .....	55
Abbildung 21: Regelschema Lüftung .....	56
Abbildung 22: Regelschema Bauteilheizung.....	59
Abbildung 23: Regelschema Bauteilkühlung.....	60
Abbildung 24: Thermisch aktivierte Wandflächen.....	62
Abbildung 25: Schematische Belegung zweier Wandflächen mit Heizungsrohren .....	62
Abbildung 26: Informationsflüsse zwischen MSR-Systemen.....	69
Abbildung 27: Regelbereiche und Sensor-Positionierung .....	75
Abbildung 28: Ökologische Baustoffeinteilung; Quelle: [1, p. 37] .....	77
Abbildung 29: Kohlenstoff und Photosynthese von CO <sub>2</sub> zu C; Quelle: [1, p. 38].....	78
Abbildung 30: Vom Baum zum Baustoff und zum Ende der Nutzung; Quelle: [1, p. 39].....	78
Abbildung 31: Modulare Struktur der umweltbezogenen Informationen nach EN 15978; Quelle: [1, p. 40].....	80
Abbildung 32: Begriffliche Unterscheidung von energetischen und stofflichen Ressourcen.....	86
Abbildung 33: Darstellung der stofflichen und der energetischen Bilanzierung für den Fall eines Dachbelages aus Zink.....	88
Abbildung 34: Darstellung der stofflichen und der energetischen Bilanzierung für das Baumaterial Holz. Für nachwachsende Rohstoffe ist die energetische und stoffliche Ressourcenneutralität theoretisch erreichbar .....	89
Abbildung 35: Trilogie aus GWP – Material - Energie .....	90
Abbildung 36: Für Stampflehm sind für Phase A1-A3 aggregierte Literaturdaten verfügbar. Phasen A2-A5 durch Messung innerhalb dieser Arbeit. Darstellung basierend auf DIN EN 15804.....	91
Abbildung 37: DGNB-Auszeichnungslogik; Quelle: <a href="https://www.dgnb-system.de/de/zertifizierung/bewertung/index.php">https://www.dgnb- system.de/de/zertifizierung/bewertung/index.php</a> .....	95

Abbildung 38: Bewertungssystematik für das End-Of-Life-Szenario. Dargestellt sind die Verwertungs- und Verwendungsmöglichkeiten eines Baustoffes am Ende der Lebenszeit eines Gebäudes mit einer Ampelbewertung .....	99
Abbildung 39: Aufbau Außenwand.....	102
Abbildung 40: Produktionsprozess der Stampflehmwandelemente .....	107
Abbildung 41: Schema zur Erfassung des Stromverbrauchs für den Produktionsprozess der Stampflehmelemente .....	107
Abbildung 42: Graue Energie der Stampflehmwand aufgeteilt nach Modulen .....	111
Abbildung 43: Transportdistanzen der Rohstoffe .....	113
Abbildung 44: IC-Meter-Messungen in der Alnatura-Arbeitswelt .....	118
Abbildung 45: Strommonitoring, detailliertes Konzept für eine Arbeitsinsel .....	119
Abbildung 46: Strommonitoring, aggregiertes Konzept für 4 Arbeitsplätze .....	119
Abbildung 47: Strommonitoring, aggregiertes Konzept .....	120
Abbildung 48: Strommonitoring-Konzept – Licht am Arbeitsplatz .....	120
Abbildung 49: Lage IC-Meter 2 und GLT 1.001, Fassadenbereich, 1. OG .....	123
Abbildung 50: Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 1.001 – IC-Meter 2 (Fassadenbereich, 1. OG) .....	123
Abbildung 51: Raumlufttemperatur, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 1.001 und IC-Meter 2 (Fassadenbereich, 1. OG) .....	124
Abbildung 52: Lage IC-Meter 27 und GLT 2.039, Open-Space, 2. OG.....	124
Abbildung 53: Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 2.039 – IC-meter 27 (Open-Space, 2. OG) .....	125
Abbildung 54: Raumlufttemperatur, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 2.039 und IC-Meter 27 (Open Space, 2. OG) .....	125
Abbildung 55: Lage IC-Meter 5 und GLT 1.051, Open-Space, 1. OG.....	126
Abbildung 56: Relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 1.051 – IC-Meter 5, Open-Space 1.OG.....	126

Abbildung 57: Relative Luftfeuchte, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 1.051 und IC-Meter 5, Open-Space 1.OG .....	127
Abbildung 58: Lage IC-Meter 21 und GLT 2.051, Open-Space, 2. OG.....	127
Abbildung 59: Relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 2.051 – IC-Meter 21, Open-Space 1.OG.....	128
Abbildung 60: Relative Luftfeuchte, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 2.051 und IC-Meter 21, Open-Space 1.OG .....	128
Abbildung 61: Lage IC-Meter 3 und GLT 1.004 Open-Space, 1. OG.....	129
Abbildung 62: CO <sub>2</sub> -Gehalt in der Luft, Vergleich GLT 1.004 – IC-Meter 3 (Open-Space, 1. OG) .....	129
Abbildung 63: CO <sub>2</sub> -Gehalt, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 1.004 und IC-Meter 3, Open-Space, 1.OG.....	130
Abbildung 64: Lage IC-Meter 13 und GLT 2.004 Open-Space, 2. OG.....	130
Abbildung 65: CO <sub>2</sub> -Gehalt in der Luft, Vergleich GLT 2.004 – IC-Meter 13 (Open Space, 2. OG) .....	131
Abbildung 66: CO <sub>2</sub> -Gehalt, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 2.004 und IC-Meter 13, Open Space, 2.OG .....	131
Abbildung 67: Temperatur [°C] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00).....	133
Abbildung 68: Absolute Luftfeuchte [g/kg] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00) .....	133
Abbildung 69: h,x-Diagramm - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00); Komfortbereich (grau) nach DIN 1946-6 [18].....	134
Abbildung 70: h,x-Diagramm - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, Belegungszeit); Komfortbereich (grau) nach DIN 1946-6 [18].....	134
Abbildung 71: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00); Behaglichkeitsbereich (grau) nach DIN EN 15251 [19].....	135

Abbildung 72: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) – Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019) (Belegungszeit); Behaglichkeitsbereich (grau) nach DIN EN 15251 [19] .....	135
Abbildung 73: CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00) .....	136
Abbildung 74: CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, Belegungszeit) .....	136
Abbildung 75: Temperatur [°C] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00).....	138
Abbildung 76: Absolute Luftfeuchte [g/kg] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00) .....	138
Abbildung 77: h,x-Diagramm- Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00).....	139
Abbildung 78: h,x-Diagramm- Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, Belegungszeit) .....	139
Abbildung 79: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) – Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00).....	140
Abbildung 80: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) – Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, Belegungszeit) .....	140
Abbildung 81: CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00) .....	141
Abbildung 82: CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, Belegungszeit) .....	141
Abbildung 83: Temperatur [°C] - Sommer 2020 (1.6.2020 – 30.9.2020, 00:00 – 24:00) .....	142
Abbildung 84: h,x-Diagramm - Sommer 2020 (1.6.2020 – 30.9.2020, 00:00 – 24:00).....	143
Abbildung 85: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) – Sommer 2020 (1.6.2020 – 30.9.2020, 00:00 – 24:00) .....	143
Abbildung 86: Jährlicher Stromverbrauch und PV-Stromerzeugung – Gesamtgebäude .....	144

Abbildung 87: Jährliche PV-Stromerzeugung, Direktnutzung und NetZRückspeisung	145
Abbildung 88: Stromverbrauch- und erzeugung, Jahresverlauf 2019.....	146
Abbildung 89: Stromverbrauch- und erzeugung, Jahresverlauf 2020.....	146
Abbildung 90: Stromverbrauch- und erzeugung, Verlauf über eine Winterwoche (18.11.2019 – 25.11.2019) .....	147
Abbildung 91: Stromverbrauch- und erzeugung, Verlauf über eine Sommerwoche (24.06.2019 – 30.06.2019) .....	147
Abbildung 92: Ausgewählte Tagesganglinien der Stromverwendung für 2019 .....	148
Abbildung 93: Ausgewählte Tagesganglinien der Stromverwendung für 2020 .....	149
Abbildung 94: Stromleistung an einer Arbeitsinsel mit 4 Arbeitsplätzen (Bürogeräte ohne Licht) über ein Jahr (01.06.2019 - 31.05.2020) .....	150
Abbildung 95: Stromleistung an einer Arbeitsinsel mit 4 Arbeitsplätzen (Bürogeräte ohne Licht) über eine Woche (18.11. – 24.11.2019) .....	151
Abbildung 96: Stromleistung an einer Arbeitsinsel mit 4 Arbeitsplätzen (Licht) über eine Woche (18.11. – 24.11.2019) .....	151
Abbildung 97: Messaufbau für Luftgeschwindigkeitsmessung am Boden mit dem TSI .....	154
Abbildung 98: Messung Luftgeschwindigkeit am Boden in acht Zentimetern Höhe ...	155
Abbildung 99: Abdeckung am Boden .....	155
Abbildung 100: Messung der Luftgeschwindigkeit mit dem TSI im Schacht .....	156
Abbildung 101: Messung der Luftgeschwindigkeit am Auslass RLT.....	156
Abbildung 102: IR-Bild vom vertikalen Kanal im EG.....	162
Abbildung 103: Bild ohne IR-Kamera vom vertikalen Kanal im EG .....	162
Abbildung 104: IR-Bild vom vertikalen Kanal im EG, größerer Ausschnitt.....	163
Abbildung 105: Bild ohne IR-Kamera vom vertikalen Kanal im EG, größerer Ausschnitt .....	163
Abbildung 106: IR-Bild vom vertikalen Kanal im OG1 .....	164

Abbildung 107: Bild ohne IR-Kamera vom vertikalen Kanal im OG1 .....	164
Abbildung 108: IR-Bild vom vertikalen Kanal im OG2 .....	165
Abbildung 109: Verwendete Nebelmaschine zur Abbildung der Luftströmungen im Gebäude; Quelle: <a href="https://www.thomann.de/de/stairville_af_150_dmx_fog_machine.htm">https://www.thomann.de/de/stairville_af_150_dmx_fog_machine.htm</a> .....	167
Abbildung 110: Messaufbau Rauchversuch Position 1 .....	168
Abbildung 111: Infrarotauflösung Außenfassade West .....	169
Abbildung 112: Referenz zu Abbildung links .....	169
Abbildung 113: Infrarotauflösung Oberlichter .....	170
Abbildung 114: Referenz zu Abbildung links .....	170
Abbildung 115: Rauchversuch an den Oberlichtern ohne Blendschutz und Konvektoren .....	170
Abbildung 116: Rauchversuch an den Konvektoren.....	171
Abbildung 117: Rauchversuch an den Oberlichtern ohne Blendschutz mit Konvektoren .....	172
Abbildung 118: Infrarotauflösung Oberlichter mit Blendschutz .....	173
Abbildung 119: Referenz zu Abbildung links .....	173
Abbildung 120: Rauchversuch an den Oberlichtern mit Blendschutz und Konvektoren .....	173
Abbildung 121: Rauchversuch an den Oberlichtern mit Blendschutz ohne Konvektoren .....	174
Abbildung 122: Umfrage zur Behaglichkeit .....	177
Abbildung 123: Lage GLT-Sensoren und IC-Meter EG .....	I
Abbildung 124: Lage GLT-Sensoren und IC-Meter OG1 .....	II
Abbildung 125: Lage GLT-Sensoren und IC-Meter OG2.....	III

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messgrößen Wetterstation .....	73
Tabelle 2: Messgrößen Innenzonen.....	74
Tabelle 3: Kubaturen und Flächen.....	92
Tabelle 4: Endenergiebedarf Real vs. Referenz.....	92
Tabelle 5: Aufteilung Baustoffe nach Materialklasse .....	94
Tabelle 6: Übersicht der Primärenergiewerte für Plattendämmstoff (Total) für den Einbau aus [9] .....	97
Tabelle 7: Stoffgrößen Stampflehm .....	104
Tabelle 8: Datenerfassung des Realisierungsprozesses der Stampflehmfassade.....	108
Tabelle 9: Primärenergiefaktoren.....	109
Tabelle 10: Quantifizierung des Primärenergiebedarfs in Modul A1 basierend auf Literaturwerten .....	110
Tabelle 11: Transportdistanzen der einzelnen Rohstoffe der Stampflehmwand und dem daraus resultierenden Primärenergieanteil .....	113
Tabelle 12: Wetterstation Messgrößen .....	115
Tabelle 13: Wärme- und Kälteverbraucher Messgrößen.....	116
Tabelle 15: Messgrößen zur Bewertung des Stromverbrauchs.....	116
Tabelle 16: Messgrößen zur Bewertung des Raumkomforts.....	117
Tabelle 17: IC-Meter-Messeinheit; Quelle: <a href="https://www.ic-meter.com">https://www.ic-meter.com</a> .....	118
Tabelle 18: Fritz!DECT 210; Quelle: <a href="https://avm.de/">https://avm.de/</a> .....	119
Tabelle 19: Strommessgeräte OG1 und OG2 .....	121
Tabelle 20: Kategorien der CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Luft nach DIN EN 13779 [20] .	136
Tabelle 21: Stromverbrauch Arbeitsplätze .....	150

Tabelle 22: Air Velocity Meter; Quelle: <a href="https://tsi.com/getmetafile/a9a281f9-8bca-4bcf-8377-2644142b72ef/9545">https://tsi.com/getmetafile/a9a281f9-8bca-4bcf-8377-2644142b72ef/9545</a> .....	153
Tabelle 23: Flir Ex Serie; Quelle: <a href="https://www.flir.de/instruments/ex-series/">https://www.flir.de/instruments/ex-series/</a> .....	153
Tabelle 24: Messergebnisse Erdkanal .....	157
Tabelle 25: Messergebnisse am Auslass RLT .....	157
Tabelle 26: Messergebnisse Erdgeschoss bei Zuluft 40% .....	158
Tabelle 27: Messergebnisse Erdgeschoss bei Zuluft 75% .....	159
Tabelle 28: Messergebnisse 1. Obergeschoss bei Zuluft 40% .....	159
Tabelle 29: Messergebnisse 1. Obergeschoss bei Zuluft 75% .....	159
Tabelle 30: Messergebnisse 2. Obergeschoss bei Zuluft 40% .....	160
Tabelle 31: Messergebnisse 2. Obergeschoss bei Zuluft 75% .....	160

# Abkürzungen und Begriffserklärungen

Alnatura I	Forschungsprojekt Az: 32312/01 „Entwicklung von Strategien zur Implementierung des grauen Energieaufwands in den iterativen, integrierten Entwurfsprozess von Gebäuden“
Alnatura II	Dieses Forschungsprojekt Az: 32312/02 „Prozessbegleitende Planung, Umsetzung, Monitoring und Dokumentation eines ressourcenneutralen Neubaus: die Alnatura-Arbeitswelt in Darmstadt“
EEWärmeG	Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPD	Environmental Product Declaration (deutsch: Umweltproduktdeklaration)
F <sub>c</sub>	Abminderungsgrad einer Sonnenschutzvorrichtung
GLT	Gebäudeleittechnik
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad eines transparenten Bauteils
IC-Meter	Indoor Climate Meter (deutsch: Raumklimamessgerät)
LCA	Life Cycle Assessment (deutsch: Lebenszyklusanalyse)
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
Ökobaudat	Datenbank für die Ökobilanzierung von Gebäuden
PE	Primärenergie
PENRT	Primärenergie, nichterneuerbar, total
PERT	Primärenergie, erneuerbar, total
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient

# Antragsteller und Kooperationspartner

## **ANTRAGSTELLER**

### **Campus 360 GmbH (C360)**

Alexander Link

Darmstädter Straße 63

64404 Bickenbach

Die Firma Campus 360 GmbH wurde gegründet zum Erwerb von unbebauten bzw. bebauten Grundstücken sowie zur Errichtung, zum Umbau und zur Instandsetzung von Gebäuden zur anschließenden Vermietung. Ziel ist die Errichtung von nachhaltigen Immobilien, die im Sinne einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung entwickelt werden und damit das Schaffen von nachhaltigen und langfristigen Werten. Die Campus 360 GmbH vertritt den Bauherren Alnatura.

## **KOOPERATIONSPARTNER**

### **Technische Universität München**

#### **Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen (TUM)**

Prof. Thomas Auer

Arcisstraße 21

80333 München

Telefon: 089 289 22475

Telefax: 089 289 23851

[klima@lrz.tum.de](mailto:klima@lrz.tum.de)

Der Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen (vormals Bauklimatik und Haustechnik) ist Teil der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München. Ordinarius des Lehrstuhls ist Professor Thomas Auer.

Fachliche Schwerpunkte des Lehrstuhls sind energieoptimiertes und klimagerechtes Bauen, Aufenthaltsqualität, ganzheitliches Planen, passive Gebäudekonzepte, innovative Gebäudetechnik, Nachhaltigkeit sowie städtische Energiekonzepte im gesamtenergiewirtschaftlichen Kontext.

Am Lehrstuhl beschäftigt sind ca. 20 Mitarbeitende der Fachrichtungen Architektur, Maschinenbau, Wirtschaftsingenieurwesen und Umweltwissenschaften. Dieses äußerst interdisziplinäre Team verfügt über eine langjährige Forschungserfahrung, wobei die zahlreichen durchgeführten Projekte stets von einem großen Praxisbezug geprägt sind. Die in den letzten Jahren abgeschlossenen und laufenden Projekte umfassen sowohl Forschungsaufträge von Bundes- und Staatsministerien als auch Kooperationen mit großen Industrieunternehmen, Mittelständlern und Planungsbüros.

### **Haas Cook Zemmrich - STUDIO2050 (HCZ)**

Martin Haas

Gymnasiumstraße 52

70174 Stuttgart

Telefon: 0711 22936260

Fax: 0711 22936273

[info@haascookzemmrich.com](mailto:info@haascookzemmrich.com)

haas cook zemmrich - STUDIO2050 ist ein von Martin Haas, David Cook und Stephan Zemmrich gegründetes Architekturbüro. Mit dem Ziel menschen- und umweltfreundliche Lösungen zu entwerfen, arbeitet das Studio an Stadtplanungs- und Architekturprojekten weltweit. Ziel des Büros ist eine Architektur, die dauerhaft das Leben der Menschen bereichert, sinnvolle Innovationen bietet und über die reine Funktionserfüllung hinaus einen kulturellen Mehrwert liefert. Als Mitbegründer des DGNB und anderer Initiativen, sind die Gründer Teil eines umfangreichen Netzwerks innovativer, nachhaltiger Architektur. Das STUDIO2050 lädt Experten verschiedener Disziplinen, wie Soziologen, Energieberater und Materialforscher ein, nach neuen Ansätzen für die Entwicklung und Umsetzung einer nachhaltigen Architektur zu forschen.

Martin Haas ist stellvertretender Präsident der DGNB. Vor der Gründung des eigenen Büros waren Martin Haas und David Cook Partner bei Behnisch Architekten, Stuttgart. Im Rahmen ihrer Tätigkeit bei Behnisch Architekten waren die beiden involviert in Lehre und Forschung mit zahlreichen Lehraufträgen/Gastprofessuren in Deutschland und den USA.

### **Transsolar (TS)**

Christian Frenzel

Curiestraße 2

70563 Stuttgart

Telefon: 0711 679760

Das Unternehmen Transsolar beschäftigt rund 60 Mitarbeitende an den Standorten Stuttgart, München, Paris und New York. Die von Transsolar initiierte und ausgeübte Ingenieursdisziplin, oft als KlimaEngineering bezeichnet, ersetzt nicht die klassische Haustechnikplanung bzw. Bauphysik. Vielmehr ist sie als Gewerke übergreifende Leistung zu sehen, die von der Architektur über das Tragwerk bis hin zur Haustechnik ein Gesamtkonzept spannt.

Ziel der Tätigkeit von Transsolar ist die Optimierung des Gebäudeentwurfs und seiner Technik. Die für den Betrieb benötigte Primärenergie, die Investitionen für die Gebäudetechnik und für das Gebäude selbst sind zu minimieren, wobei Behaglichkeit und Komfort optimiert werden. Gleichzeitig sind die entsprechenden Nutzungsanforderungen zu gewährleisten. Bewertungen mittels Computer-Simulationen erlauben es, Entscheidungsgrundlagen zu erstellen, die Aufwand und Nutzen einzelner Maßnahmen detailliert gegenüberstellen. Den Einsatz von Simulationswerkzeugen versteht Transsolar als interaktives Instrument mit dem Ziel einer fortlaufenden Gebäudeoptimierung hinsichtlich Komfort und Energieverbrauch. Primäres Ziel der Arbeit ist es, die architektonisch räumlichen Qualitäten in Bezug auf die technischen Qualitätsmerkmale wie Licht, Luftqualität, Raumklima und Akustik so zu unterstützen, dass ein angenehmes und freundliches Ambiente entsteht. Dies gilt es zu kombinieren mit einem minimierten Aufwand in Bau und Unterhalt des Gebäudes. Das Erarbeiten und Bewerten unterschiedlicher Varianten ist dabei ein selbstverständlicher Bestandteil.

## **Lehm Ton Erde Martin Rauch (LTE)**

Werkstatt für Keramik + Lehmbau

Quadernstraße 7

6824 Schlins, Österreich

Telefon +43 (0)5524 8327

Lehm - Ton - Erde. Diese drei Worte prägen seit über 30 Jahren das Wirken von Martin Rauch. Sie beschreiben die ganzheitliche Philosophie des Betriebs. LEHM steht für Handwerk und Technologie, TON für künstlerische Gestaltung, ERDE für die Nachhaltigkeit des Lehmbaus.

Der Betrieb zeichnet sich einerseits durch die langjährige Erfahrung mit dem Material Lehm und andererseits durch die stete Arbeit an der Weiterentwicklung der Bautechnik und den Anwendungsmöglichkeiten aus.

# Zusammenfassung

Die Vorgabe an die Planer war, ein ressourcenschonendes Gebäude zu erschaffen, das eine symbiotische Verbindung mit der Natur und der Umgebung eingeht und die nachhaltige Nutzung vorhandener Ressourcen beinhaltet. Zentrale Elemente sollten zudem eine schlichte, naturnahe Ästhetik und eine hohe Arbeitsqualität für die rund 400 Mitarbeitenden sein. In dem DBU - geförderten Forschungsprojekt wurde dieser Frage intensiv nachgegangen. Dem Leitgedanken „einfach Bauen“ folgend, suchte das interdisziplinäre Team nach robusten Konstruktionen, reduzierten und möglichst passiven Technikkonzepten sowie ressourcenschonenden Lösungen für Baustoffe und Bauteile.

Mit diesem Bericht widmen wir uns der Frage, welche Potenziale der Baustoff Lehm für ein Bürogebäude mit Open-Space Charakter birgt. Welche Auswirkungen haben die hygroskopischen und thermischen Eigenschaften des Stampflehms auf den Innenraumkomfort? Anhand eines umfangreichen Monitorings und entsprechender Nutzerumfragen können sehr anschaulich die Vorteile des Baustoffs Lehm dargestellt werden. Auch ist es wichtig zu zeigen, welche Art der minimalen Gebäudetechnik notwendig ist, um den Baustoff in seiner Funktionalität maximal zu unterstützen. Um den Energiebedarf für den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden zu reduzieren, muss die graue Energie berücksichtigt werden. Datenbanken wie beispielsweise die deutsche Ökobaudat liefern Informationen für eine Lebenszyklusbewertung (LCA). In Bezug auf Stampflehm werden aggregierte Werte für die Produktstufen bereitgestellt. Allerdings wird der Transport, und die Bauprozesse kaum dokumentiert. Daher wurde der Energiebedarf für den Transport, die Produktion und den Bau gemessen und dokumentiert. Man kann feststellen, dass der Transport den größten Einfluss auf die graue Energie von Stampflehmfassaden hat, weshalb es wichtig ist, lokales Material zu verwenden, das am Ende eine ganzheitliche Einbindung in den Stoffkreislauf ermöglicht. Neben dem Fokus auf den Baustoff Lehm lieferten die Untersuchungen wichtige Erkenntnisse für die Gestaltung und Nutzung von großen offenen Lufträumen mit Arbeitsplätzen. Insbesondere wurde die zunächst nicht erklärbare Ursache für starke Luftbewegungen und die damit einhergehenden Zugerscheinungen, identifiziert. Kurzzeitmessungen und Rauchversuche unterstützen die Ursachenforschung und zeigten potenzielle Lösungen auf.

Insgesamt kann gezeigt werden wie ressourcenschonend, energiesparend und gering technisiert auch im Büro- und Gewerbebereich gebaut werden kann. Die Optimierung des Betriebs und damit die Minimierung des Energiebedarfs muss von den Betreibern weiterverfolgt werden. Die Ergebnisse des Monitorings zeigen, dass es noch weiter auszuschöpfende Potenziale gibt.

# 1. Einleitung: Zukunftsfähiges Gewerbe

Dieses Kapitel ist ein Auszug aus [1].

## **Sabine Djahanschah DBU**

Die Nachfrage nach attraktiven Arbeitsstätten und Gewerbeflächen nimmt zu. Laut Konjunkturumfrage der Industrie- und Handelskammern haben 80 Prozent der Unternehmen der Bauwirtschaft Probleme, offene Stellen zu besetzen. Attraktive Standorte mit hoher Lebensqualität sollen daher Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter anziehen und binden. Dem folgt die starke Nachfrage nach Büroimmobilien in Ballungsräumen. Auch die Zahl der Betriebsgründungen in den Städten nimmt wieder zu. Die Nähe zu Bildungs- und Forschungseinrichtungen sowie leistungsstarke digitale Infrastrukturen gewinnen an Bedeutung. Folgerichtig wurde 2017 die Kategorie des urbanen Gebietes in die Nutzungsverordnung eingeführt. Sie soll der Idee der Stadt der kurzen Wege mit dichten, durchmischten Quartieren Vorschub leisten. In urbanen Gebieten können Wohnen, Gewerbe, soziale und kulturelle Einrichtungen in einem Baugebiet verwirklicht werden.

Neben dem attraktiven Umfeld rückt die Qualität der Gewerbebauten selbst in den Blickpunkt und spiegelt dabei die Unternehmenskultur und die Wertschätzung für die Mitarbeitenden wider. Dabei wird die architektonisch-räumliche Qualität durch die Materialität des Gebäudes und den erzielten Komfort mitbestimmt. Natürliche Materialien empfindet der Mensch als warm und einladend. Auch bauphysikalische Parameter werden von diesen Baustoffen positiv beeinflusst und können im Wechselspiel mit einer optimierten Kubatur zu Energieeinsparungen beitragen.

## **Ressourceneffizienz im Bauwesen**

Wir leben in einer globalisierten Gesellschaft mit internationalen Handelsbeziehungen und einer weltweiten Energie- und Ressourcenkonkurrenz. Was dies bedeutet, zeigt allein der Zementverbrauch in China. Laut der „International Cement Review“, London, ist im Vergleich zum Jahr 1980 die weltweite Zementproduktion um 3.000 Prozent gestiegen. In den Jahren 2011 bis 2013 lag Chinas Zementverbrauch mit 6,4 Gt um 40 Prozent über dem der USA mit 4,4 Gt – im gesamten 20. Jahrhundert.

Das Bauwesen gehört zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftszweigen. Laut VDI werden allein in Deutschland jährlich 517 Mio. t mineralische Rohstoffe verbaut. Laut BMU erzeugt der Bausektor ca. 59 Prozent des in Deutschland anfallenden Abfalls. Daher muss zukünftig die Ressourcenverwendung im Bauwesen neu gedacht werden. „Urban Mining“ heißt das Zauberwort, das den Gebäudebestand als Rohstofflager einbezieht.

Obwohl der Gedanke, Kreisläufe zu schließen, in der Nachhaltigkeitsdiskussion nicht neu ist, landen bei Abbruch- und Sanierungsmaßnahmen hochwertige Baumaterialien weitgehend als „Downcycling“ im Straßenbau. Daher sind Strategien zu entwickeln, um die in Gebäuden verbauten Ressourcen effizienter im Sinne einer Kreislaufführung zu verstehen und Materialien sowie Konstruktionen dahingehend zu optimieren. Dies beinhaltet die Langlebigkeit und Reparaturfreundlichkeit, einfach trennbare Verbindungen, die Vermeidung von Verbundbaustoffen sowie wiederverwendbare Materialien und Bauteile.

### **Nutzungszyklen im Gewerbebau**

Während für die Nachhaltigkeit im Bauwesen eine möglichst langfristige Nutzung entscheidend ist, wird gerade der Industrie- und Gewerbebau durch kurzfristigere Perspektiven geprägt. Veränderte Rahmenbedingungen erfordern rasche Anpassungsstrategien in der Produktion. Als Folge davon sind die Gebäudehüllen oft nur auf kurze Lebenszeiten kalkuliert. Eine denkbare Alternative wäre eine mitwachsende Gebäudehülle, bei der sich im Erweiterungsfall bestehende Bauteile zerstörungsfrei trennen, einfach versetzen und somit weiterhin nutzen lassen.

### **Arbeitsbedingungen und Gebäudetechnik**

Im Gewerbebau sind spezifische klimatische Voraussetzungen zu erfüllen, weil niedrigere Raumtemperaturen erforderlich sind. Die Kosten-Nutzen-Rechnungen ergaben daher, dass sich der Mehraufwand einer passivhaustauglichen Wandkonstruktion rechnet, jedoch eine Dreifach-Verglasung im Lebenszyklus ihre Mehrkosten nicht einspielt. Sowohl die Produktion als auch die Serverkapazitäten erzeugen Abwärme, die im Bereich von Gewerbe- und Bürobauten genutzt werden sollte.

### **Passive Klimatisierung**

Die Moderne hat mit ihren filigranen Stahl-Glas-Konstruktionen nicht nur einen neuen internationalen Stil ins Leben gerufen. Die Entwicklung der Gebäudetechnik hat zudem über Jahrhunderte gesammeltes Wissen zu passiven Klimatisierungsmethoden ersetzt. In einem relativ kurzen Zeitraum konnte sich die Architektur scheinbar losgelöst von ihren Klimatisierungsfunktionen entwickeln. Dies führte zu einer deutlichen Verschiebung der Aufwendungen für die Gebäudekonstruktion hin zu einem verstärkten Technikeinsatz. Ein von den Außentemperaturen losgelöstes Innenraumklima in einem normierten Rahmen wurde zum Erwartungshorizont.

Erst steigende Energiepreise sowie hohe Wartungs- und Erneuerungskosten rückten den Preis für diese Gestaltungsfreiheit und die gestiegenen Komfortansprüche ins Bewusstsein. Theoretische Energieeinsparungen und Komfortversprechen konnten dabei in der Praxis nicht immer erreicht werden. Daher drängt sich die Frage auf, ob eine Rückbesinnung auf passive Klimatisierungskonzepte, die natürliche Thermik über spezielle Geometrien und Baustoffe in ihrer Wärmeleitfähigkeit und Feuchtepufferung nutzen, in der heutigen Zeit einen relevanten Beitrag zur Gebäudeklimatisierung leisten können. Die begleitende Forschung zur Alnatura-Arbeitswelt behandelt daher die folgende Frage: Kann die gezielte Auswahl von Baustoffen im Zusammenhang mit einem optimierten Entwurf den Einsatz von Gebäudetechnik auf ein Minimum beschränken? Es lag dabei auf der Hand, auch ein uraltes Material, den Lehm, in den Blick zu nehmen. Denn Lehm bringt aktivierbare Masse in ein Gebäude und puffert Wärmespitzen. Die eingelagerte Wärmeenergie kann phasenverschoben in kühleren Nachtzeiten wieder abgegeben werden. Ein mit dieser Funktionsweise zusammenarbeitendes Lüftungskonzept kann den Bauteilen über Nacht die Wärme wieder entziehen, um die Speicherwirkung für die nächste Hitzeperiode erneut zu nutzen. In ähnlicher Weise lässt sich auch eine erhöhte Raumlufffeuchte über die feuchtepuffernde Wirkung des Lehms ausgleichen.

### **Ökobilanzielle Optimierung der Ressourcen**

Neben der natürlichen Klimatisierungsfunktion ist auch die Ökobilanz über den Lebenszyklus von Bedeutung. So sollte im neuen Hauptsitz von Alnatura der ökologische Rucksack, den jeder Baustoff mit sich führt, möglichst über den gesamten Lebensweg minimiert werden. Dazu gehören die Rahmenbedingungen der Rohstoffgewinnung, die Prozesse der Verarbeitung ebenso wie die Phase der Nutzung und Reparatur bis zum Abbruch und der möglichen Wiederverwendung. Die Vorteile nachwachsender Rohstoffe sind hier ebenso offenkundig wie die des natürlich vorkommenden Lehms. Während nachwachsende Rohstoffe weitere Umweltleistungen wie CO<sub>2</sub>-Bindung, Sauerstoffproduktion und Staubfilterung, aber auch Erholungsfunktionen u. a. m. während der Wachstumsphase erbringen, ist Lehm als Baustoff nahezu überall auf der Welt über den Aushub der Baugrube verfügbar. Nach der Nutzung kann der Baustoff wiederverwendet oder dem Boden zurückgegeben werden, ohne aufwendige Aufbereitungsprozesse durchlaufen zu müssen. Die dazu in modernen Bautechnologien notwendigen Standardisierungsmaßnahmen werden durch die DBU bereits seit der Erstellung der Lehmbauregeln bis hin zur Entwicklung von Lärmschutzwänden vorangetrieben.

## **Langfristige Nutzbarkeit und Flexibilität**

Die langfristige Nutzbarkeit von Gebäuden stellt ein zentrales Nachhaltigkeitskriterium dar. Neben dem Konzept der Erweiterbarkeit und der Wiederverwendung von ganzen Bauteilen sind noch weitergehende Strategien denkbar.

## **Ausblick**

Die Entwicklung neuer gemischter Gewerbe- und Quartiersstrukturen birgt große Potenziale, das Leitbild der verdichteten Stadt mit Vorbildern für eine lebenswerte Zukunft zu füllen. Je mehr der Gewerbebau durch seine räumlichen und gestalterischen Qualitäten zur Heimat wird, desto länger wird er genutzt und gepflegt und desto nachhaltiger ist seine Bilanz. Natürliche Materialien leisten hier nicht nur einen nachweisbaren ökologischen Beitrag, sondern überzeugen auch durch ihre behagliche Atmosphäre. Das Gebäude wird damit zum werbewirksamen Statement des Unternehmens.

## 2. Aufgabenstellung und Zielsetzung: innovativer Charakter und Umweltrelevanz

Aus den Erkenntnissen des vorangegangenen Forschungsprojektes „Entwicklung von Strategien zur Implementierung des grauen Energieaufwands in den iterativen integrierten Entwurfsprozess von Gebäuden“ („Alnatura I“), wurden in der Realisierung des Gebäudes durch das vorliegende Forschungsprojekt („Alnatura II“) folgende Schwerpunkte vertieft analysiert und evaluiert:

### 2.1 Arbeitsplan und Darstellung des Lösungsweges

Das vorliegende Forschungsprojekt ist in zwei voneinander unabhängige Phasen gegliedert. Im Rahmen der Projektphase 1 soll der Realisierungsprozess dieses innovativen Bauvorhabens wissenschaftlich begleitet werden. Daran anknüpfend soll in der Projektphase 2 das Gebäude im Betrieb- durch ein zweijähriges Monitoring- auf die angestrebten Ziele hin überprüft werden. Durch die Kombination der beiden Phasen ist es möglich, den integralen Planungs- und Realisierungsprozess der Alnatura-Arbeitswelt auf den Gesamtenergetischen Aufwand in der Realisierung und im Betrieb auf Ressourcenneutralität zu überprüfen und damit die Erkenntnisse dieser Methodik auf andere Fälle übertragbar zu machen.

#### **Phase 1**

##### **Begleitung der Umsetzung mit Bewertung der Prozesse**

Energetischer Aufwand; Aufnahme und Analyse der einzelnen Prozessphasen; Erstellung einer Datenbank für die graue Energie von Stampflehm und anderer Bauteile in der Herstellung und Implementierung. Die Phase I ist in die Arbeitspakete 1-6 gegliedert

AP1: Koordination integraler Planungsprozess in Bezug auf Baubeginn

AP2: Evaluierung Realisierungsprozess der Stampflehmwand

AP3: Datenaufnahme Realisierung Stampflehmwände

AP4: Datenaufnahme Realisierung ausgewählter Bauteile

AP5: Erstellung einer Evaluierungsmatrix aus den Ergebnissen der AP 3 und 4

AP6: Evaluierung des Planungs- und Bauprozesses in Bezug auf Ressourcenneutralität

## Phase 2

### Monitoring, Betriebsoptimierung und Abschlussdokumentation

Datenerfassung zu Raumklima und bauphysikalischen Eigenschaften von Stampflehm; Vergleich der durch Simulation erwarteten Ergebnisse mit erfassten Daten; Optimierung des Betriebes; Zusammenfassung der Ergebnisse und Erarbeitung allgemeiner Aussagen zu Strategien und Prozessen, Publikation und Öffentlichkeitsarbeit. Die Phase 2 ist in die Arbeitspakete 7-10 gegliedert.

AP7: Monitoring und Betriebsoptimierung

AP8: Verifizierung des Gebäudes im Betrieb auf Nutzeranspruch

AP9: Evaluierung des gesamten energetischen Aufwandes für den Bauprozess und den Betrieb in Bezug auf Ressourcenneutralität

AP10: Zusammenfassung der Ergebnisse und Abschlussdokumentation

## 2.2 Bewertung der Herstellungs- und Errichtungsphase

Die Bewertung der grauen Energie des Stampflehms aus „Alnatura I“ basiert oftmals auf veralteten Werten bzw. auf Werten, die einen wesentlich höheren Anteil an reinem Lehm annehmen, wie er auch in der Ziegelindustrie Verwendung findet.

Das bestgeeignete Rohmaterial für die Stampflehm Bauweise ist Aushub. Ein Material, das in der Ziegelindustrie ein Abfallprodukt wäre. Die Ziegelherstellung benötigt durch den hohen Wassergehalt des verarbeiteten Lehms produktionsbedingt zusätzliche Trocknungsenergie. Der Stampflehm wird nur erdfeucht verarbeitet und kann somit an der Luft trocknen. Das heißt, dass sowohl bei der Gewinnung des Materials für die Ziegelindustrie potentiell mehr Energie benötigt wird, als auch bei der Trocknung. Nicht stabilisierter Stampflehm ist wasserlöslich und kann ohne Qualitätsverlust mit geringer Umsetzungsenergie (im Gegensatz z.B. zum Recyclingbeton) wiederverwendet, oder ohne Umweltbelastung der Natur zurückgegeben werden.

Durch eine Studie der Hochschule Luzern zum „Haus Rauch“ mit vor Ort hergestellten Stampflehmwänden konnte bereits gezeigt werden, dass der Bedarf an grauer Energie rund 40 % unter dem Wert eines konventionellen Baus liegt. [2]

Das vorliegende Forschungsvorhaben, „Alnatura II“, möchte nun den Bedarf an grauer Energie für den Bereich Herstellung, Transport und Einbau mit einem größeren Maßstab

evaluieren. Die hier erzielten Erkenntnisse lassen sich durch die wiederholbaren Bedingungen der industrialisierten Vorproduktion auch wesentlich leichter Multiplizieren und bilden damit eine Basis für eine Neubewertung des Stampflehmbaus.

Wie durch das Projekt „Alnatura I“ deutlich wurde, hat neben der Stampflehmfassade die Struktur und die Dachkonstruktion großen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes. Um den Grad der Ressourcenneutralität festzulegen, werden deswegen ausgewählte Bauteile im vorliegenden Forschungsprojekt vertieft untersucht.

## 2.3 Anforderungen an das Monitoring

Zur Validierung des Simulationsmodells und zur Überprüfung der Zielwerte des Gebäudebetriebes hinsichtlich des Komforts und des Energiebedarfs soll im Zuge dieses Forschungsvorhabens eine zweijährige Monitoringkampagne durchgeführt werden. Nach Fertigstellung des Bauvorhabens soll eine Überwachung von Betriebszuständen des Gebäudes und seiner technischen Anlagen („Monitoring“) beginnen.

Die Fertigstellung des Gebäudes erfolgte im Januar 2019. Mit der Inbetriebnahme soll das Monitoring beginnen. In einer einjährigen Kampagne wird gezielt der Betrieb aufgezeichnet, um diesen zu optimieren. Eine zusätzliche, kostenneutrale Verlängerung des Monitorings um ein Jahr soll die erhobenen Daten validieren. In dieser zweijährigen Überwachungsphase werden sowohl Energiekennwerte für den Gebäudebetrieb als auch bauphysikalische und strukturelle Eigenschaften der gewählten Fassadenkonstruktion hinsichtlich des Innenraumklimas und des Nutzerkomforts aufgenommen. Folgende Ziele für den laufenden Gebäudebetrieb werden verfolgt:

- Überprüfung von vorher festgelegten Zielwerten
- Detektion von Fehlfunktionen bzw. Umsetzungsmängeln
- Anpassung des Betriebs technischer Anlagen an sich verändernde Nutzungsanforderungen

In der Entwurfsplanung wurde sichergestellt, dass die zur Implementierung eines Gewerke übergreifenden Monitorings erforderlichen Elemente von den einzelnen Planungsbeteiligten berücksichtigt werden. Folgende Schritte sind in der anstehenden Planung erforderlich:

- Abstimmung der Konzeption mit dem Bauherrn, den Nutzern und den Planern
- Festlegung der zu erfassenden Medien

- Aufstellen eines Zählerkonzepts entsprechend der vorgesehenen Nutzung (Mieteinheiten, Verbraucherzuordnung etc.)
- Vorgaben zur Erfassung von Betriebszuständen (wie Raumkonditionen, Anlagentemperaturen, Wetterdaten)
- Vorgaben zur Erfassung von Messdaten, Speicherung und Verarbeitung der Betriebszustände

Die einzelnen Komponenten des Monitoringsystems werden von den beteiligten Fachplanern ausgeschrieben. Sinnvollerweise wird auch die Bauüberwachung und Bauabnahme von den entsprechenden Fachplanern geleistet. Zur Sicherstellung der gewerkeübergreifenden Funktion des Monitorings sollen ergänzend folgende Leistungen gewährleistet werden:

- planerische Begleitung während der Bauphase bei Bedarf
- Begleitung der Abnahme der Systeme zur Datenerfassung, Datenhaltung und Datenverwaltung, insbesondere:
  - Überprüfung der Messdatenbank
  - Datenhandling, Datenaufbereitung, Datenexport. Gegebenenfalls Angabe der zu ergänzenden Messdaten
  - Funktionsprüfung von Regelungsanlagen vor Ort
  - Test durch Emulation von Ist-Werten (hilfsweise durch Manipulation von Fühlern). Visuelle Kontrolle der Aktoren. Prüfen der dabei von der GLT bzw. dem Monitoringsystem aufgezeichneten Daten. Rückmeldung an beteiligte Firmen und Angabe von Verbesserungsvorschlägen
  - Funktionsüberprüfung mittels aufgezeichneter Daten
  - Funktionsprüfung aller Regelungsanlagen, die als ergebnisrelevant definiert sind. Rückmeldung an beteiligte Firmen und Angabe von Verbesserungsvorschlägen
  - Signalprüfung ausgewählter Sensoren

für z.B. natürliche Lüftung, Bauteilkühlung, Sonnenschutz und Kunstlicht. Vergleich der Messwerte der Sensoren mit parallel durchgeführten Messungen mittels Referenzfühlern, insbesondere die Sonneneinstrahlung.

Rückmeldung an beteiligte Firmen und Angabe von Verbesserungsvorschlägen

- Betriebsoptimierung mit Hilfe des geplanten, gebauten und abgenommenen Monitoringsystems.

Neben der Feststellung und Archivierung der Ist-Zustände eines Gebäudes und seiner technischen Anlagen dient das Monitoring der Verbesserung der Betriebsweise technischer Anlagen. Für eine erfolgreiche Optimierung ist ein Zeitraum von mindestens zwei Jahren nach Inbetriebnahme des Gebäudes anzusetzen. Hierzu werden folgende Leistungen angeboten:

- Festlegung der zu optimierenden Systeme
- Festlegung der Zielwerte
- Festlegung der Zuständigkeiten für Datenerfassung, Datenspeicherung und -aufbereitung
- Periodische Beschaffung und Analyse der Betriebsdaten
- Selektive Darstellung periodisch erfasster Daten (z.B. Monatssummen der Verbräuche Wärme, Wasser und Strom)
- Zusätzlich stichprobenartige Untersuchung ausgewählter Daten
- optional: Dynamische Simulation zur Ermittlung optimierter Parameter
- Aufzeigen von Einsparpotentialen
- Schlussfolgerung aus analysierten Betriebsdaten und Vorgabe optimierter Parameter
- Überprüfung der Optimierung durch erneute Datenanalyse

### 3. Vorstellung Bauprojekt „Alnatura-Arbeitswelt“

Das Architekturbüro haascookzemmrich STUDIO2050 plante für das Bio-Handelsunternehmen Alnatura (vertreten durch die Campus 360 GmbH) eine neue Firmenzentrale in Darmstadt. Auf dem Gelände der ehemaligen Kelley Barracks entsteht ein attraktiver, öffentlich zugänglicher Campus mit einem Bürogebäude für 400 Mitarbeiter nach den neuesten ökologischen Standards. Der Alnatura-Campus soll die gesamte Wertschöpfungskette der biologischen Landwirtschaft von der Produktion über die Verarbeitung und die Vermarktung bis zum Verkauf und Verzehr erlebbar machen. Der Baubeginn war im Juli 2016, die Inbetriebnahme und der Einzug erfolgte im Januar 2019.

Alnatura hat für die „Alnatura-Arbeitswelt“, neben der zentralen Verwaltung, folgende Umgebung definiert:

- eine Mitmach-Farm, die gemeinschaftliches Lernen und das Verstehen von landwirtschaftlichen Zusammenhängen ermöglicht. Von der Aussaat bis zur Ernte
- ein Alnatura-Super-Natur-Markt, in nachhaltiger innovativer Bauweise mit 6.000 Bio Produkten - viele davon aus der Region
- eine Genusswerkstatt, in der fundiertes Wissen über Ernährung, Zubereitung und Herstellung von Bio - Produkten vermittelt wird, bis hin zum gemeinsamen Kochen und Essen der selbstgeernteten Produkte. Eine Genusswelt mit Kochwerkstatt für Mitarbeiter und Gäste
- Lage und Ausrichtung der einzelnen Bausteine auf dem Grundstück wurden nach mikroklimatischen Gesichtspunkten festgelegt. Durch Synergien der unterschiedlichen Nutzungen, wie Restaurant und Super-Natur-Markt soll ein Vorzeigeprojekt für energie- und materialeffizientes Bauen entstehen.

Für die Alnatura-Arbeitswelt wurden folgende Ziele bzw. Parameter definiert:

- transparentes Open-Space-Büro mit Werkstattcharakter
- die Verwendung von ausschließlich nachwachsenden Rohstoffen/Baustoffen, wie Holz und Lehm bzw. vollständig rückbaubare Baustoffe wie Ziegel; kreislauffähige Baustoffe
- minimaler Energieaufwand im Betrieb

- „intelligente“ Gebäudegeometrie für eine optimale natürliche Belichtung aller Arbeitsplätze
- ein in der Gesamtbilanz klimaneutrales Bauwerk
- angenehmes Innenraumklima durch den intelligenten Einsatz von natürlichen Materialien; das Gebäude soll durch die Wärme- und Feuchtespeicherfähigkeit der gewählten Materialien fast ohne den Einsatz konventioneller haustechnischer Systeme auskommen
- natürlich belichtete und belüftete Arbeitsplätze nahezu über die gesamte Gebäudetiefe

Das Projekt konzentriert sich ausschließlich auf die Alnatura-Arbeitswelt. Sie wird als beispielhafte Unterbringung der Mitarbeiter von Alnatura geplant, in einem Gebäude, welches die Anforderungen an zukunftsgerechtes Arbeiten und nachhaltiges Bauen durch sorgfältige Wahl der Baumaterialien und den Einsatz energieeffizienter Gebäudetechnik erfüllt.

Beispielhaft wird der Bau auch hinsichtlich einer kostengünstigen und reduzierten Bauweise sein. Es entsteht eine Art „Werkstatt“, in der eine moderne und sinnvolle Arbeitsweise aufgezeigt wird, die permanent weiterentwickelt werden soll und die für Besucher sichtbar ist. Hiermit soll auch die Transparenz des Wirtschaftsbetriebs demonstriert werden.

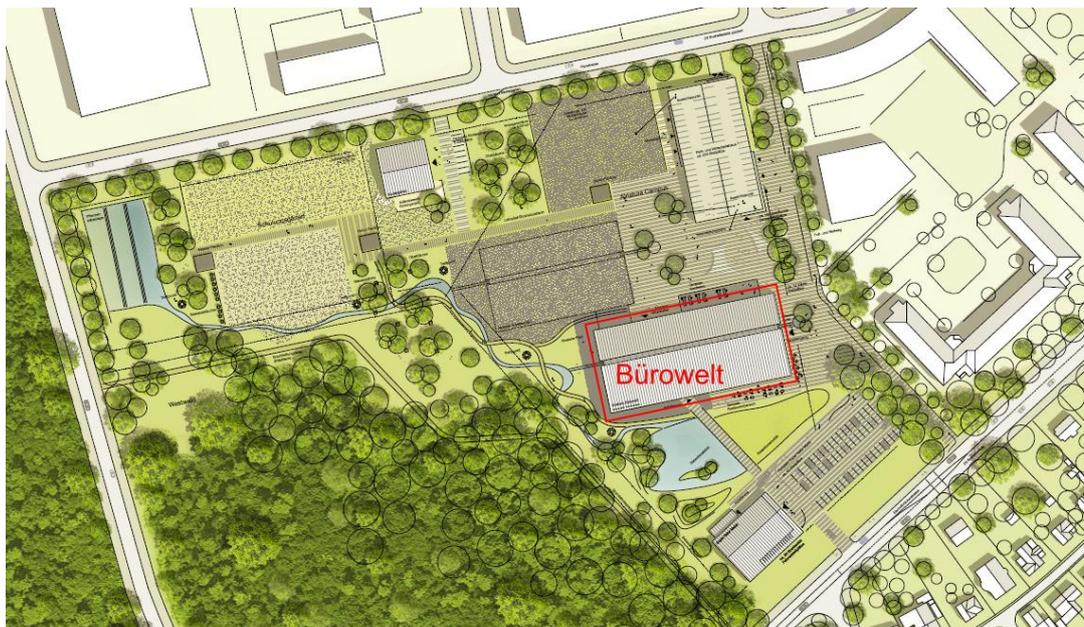
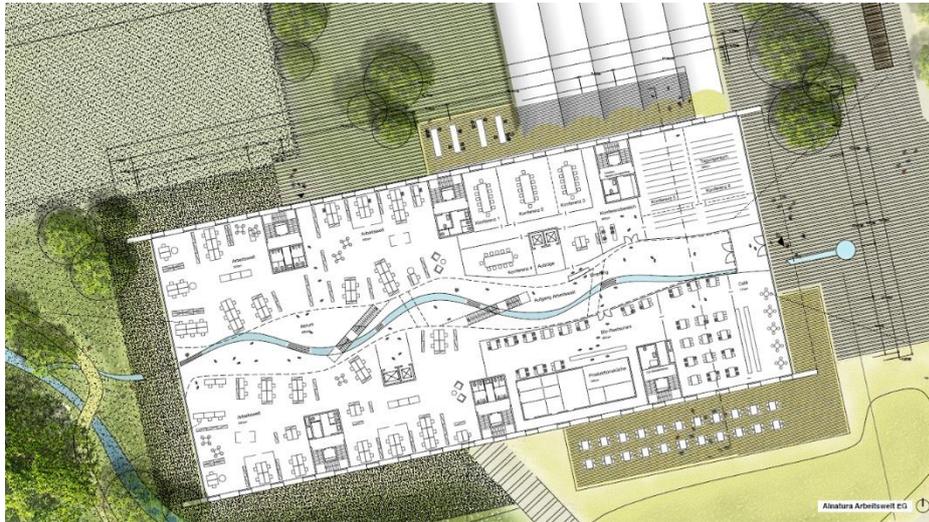
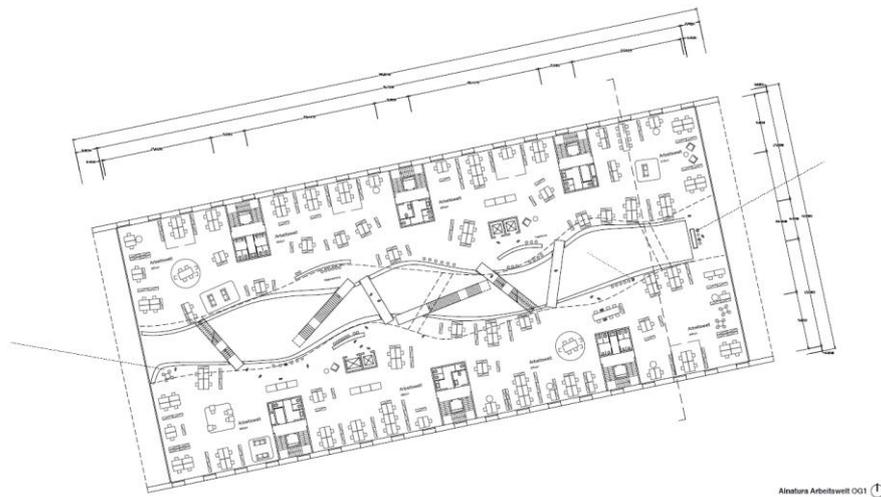


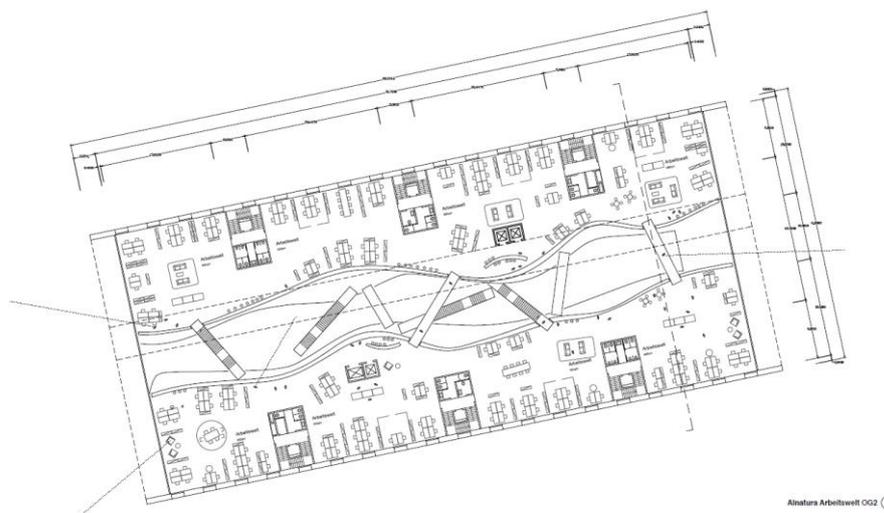
Abbildung 1: Lageplan



**Abbildung 2: Grundriss EG**



**Abbildung 3: Grundriss 1. OG**



**Abbildung 4: Grundriss 2. OG**

### 3.1 Gebäudekubatur und -hülle

Die Vorgabe an die Planer war, ein ressourcenschonendes Gebäude zu erschaffen, das eine symbiotische Verbindung mit der Natur und der Umgebung eingeht und die nachhaltige Nutzung vorhandener Ressourcen beinhaltet. Zudem sollte eine schlichte, naturnahe Ästhetik und eine hohe Arbeitsqualität für die rund 500 Mitarbeitenden zentrale Elemente sein. In einem DBU - geförderten Forschungsprojekt wurde dieser Frage intensiv nachgegangen. [4] Dem Leitgedanken „einfach Bauen“ folgend, suchte das interdisziplinäre Team nach robusten Konstruktionen, reduzierten und möglichst passiven Technikkonzepten und ressourcenschonenden Lösungen für Baustoffe und Bauteile.

Der schlichte nach Ost-West ausgerichtete Baukörper mit offenem, asymmetrischem Dachfirst wirkt hell und einladend. Entsprechend dem Leitgedanken des Unternehmens vermittelt die Lehmfassade eine bodenständige, naturnahe Ästhetik. Die verglasten Querseiten und die zahlreichen Fensterflächen auf der Längsseite ermöglichen eine optimale natürliche Belichtung der 10.000 m<sup>2</sup> umfassenden Bürofläche, die als Großraum organisiert ist. Über das große, nach Norden ausgerichtete Oberlicht fällt das Tageslicht tief in das mittig angeordnete Atrium. Den Wunsch des Bauherrn nach einem transparenten Open-Space-Büro mit Werkstattcharakter erfüllt das Gebäude hervorragend. Im Erdgeschoss befindet sich neben Besprechungs- und Konferenzräumen auch ein vegetarisches Restaurant, das fast ausschließlich Bio-Lebensmittel verarbeitet und auch für die Öffentlichkeit zugänglich ist. Die Arbeitsplätze sind verteilt auf das Erdgeschoss und die geschwungenen Galerien in den beiden Obergeschossen, die durch Stege und Treppen miteinander verbunden sind. Auf Einzelbüros und Trennwände wurde verzichtet, da ein Großteil der Mitarbeitenden mit Desksharing arbeitet, also ohne festen Arbeitsplatz. Besprechungen können in den sich auf allen Ebenen befindlichen Teeküchen stattfinden oder in Bereichen, die sich durch akustisch wirksame Vorhänge abtrennen lassen. Die Vielfalt der Räume, die flexiblen Nutzungsmöglichkeiten und die Offenheit tragen entscheidend zum besonderen Charakter des Hauses bei.

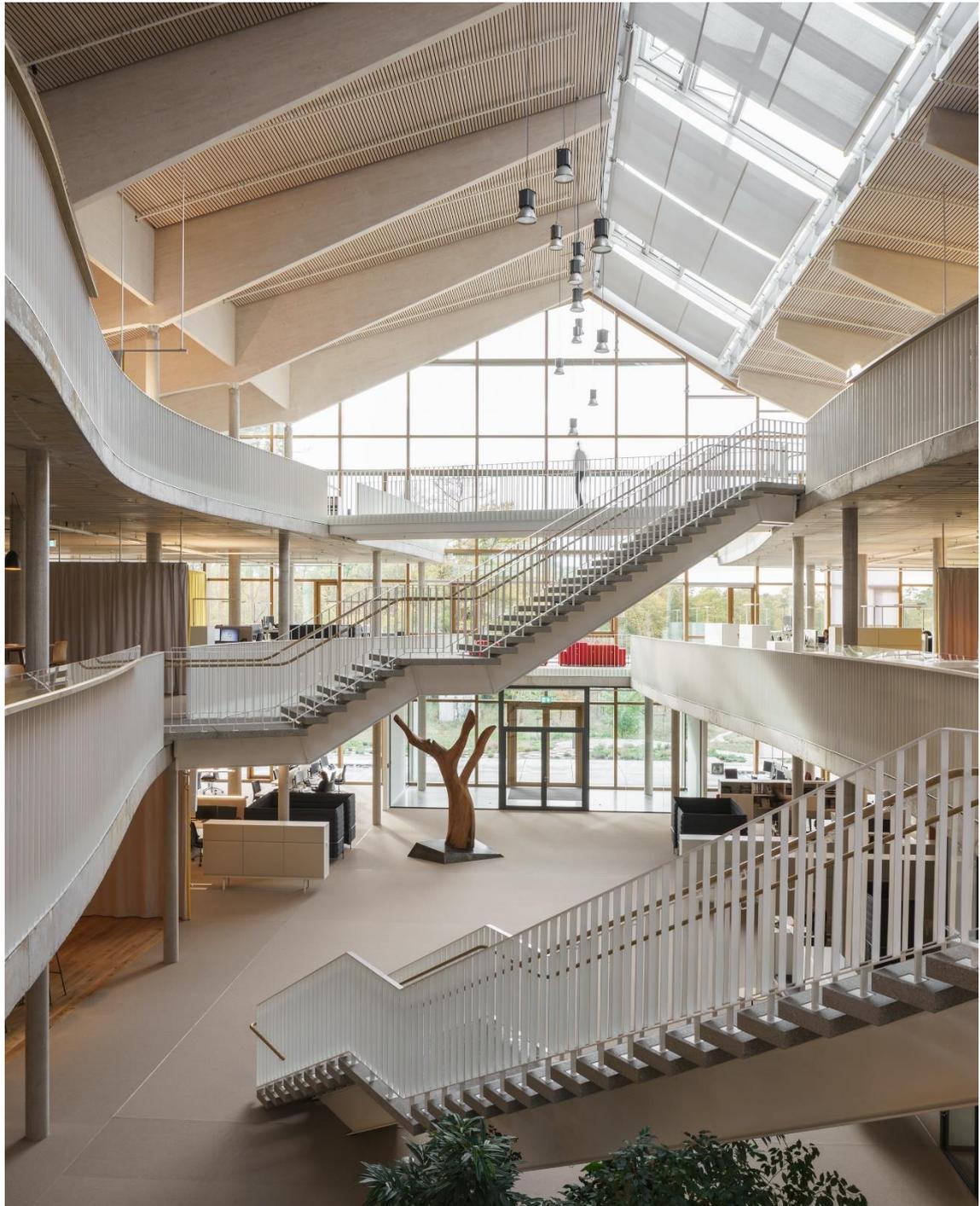
Der Einsatz von gedämmten Bauteilen aus Stampflehm in den Außenwänden erlaubt es, die klimatischen Eigenschaften von Lehm zu nutzen und gleichzeitig zeitgemäße Dämmwerte zu erreichen. Die als Hypokausten genutzten Außenwände und die hygrysch und thermisch aktive Oberfläche verbessern das Raumklima und binden Gerüche sowie Schadstoffe. Die Lehmwand zeigt auf ästhetisch ansprechende Weise, wie sich die Möglichkeiten einer nachhaltigen, ressourcenschonenden Bauweise umsetzen lassen.

Die Fassade ist so optimiert, dass sie den Bedarf an Energie für Heizung und Kühlung mit möglichst passiven Maßnahmen reduziert. Dort integriert ist eine raumhohe Vergla-

sung mit hoher Tageslichttransmission. In Verbindung mit hellen, das Tageslicht reflektierenden Oberflächen wird das Außenlicht in die Innenräume geleitet. Das offene Atrium im Gebäudezentrum sowie die Bürobereiche im Innenraum versorgt der gegen Norden ausgerichtete, zentrale Streifen von Oberlichtern mit Tageslicht. Die verglasten Flächen sind mit einem außenliegenden, beweglichen textilen Sonnenschutz versehen. Das Dachoberlicht ist mit einem innenliegenden Sonnen- und Blendschutz ausgestattet. Das Kunstlicht der allgemeinen Nutzungsbereiche, wie beispielsweise den Verkehrsflächen wird in Abhängigkeit von der Nutzung und dem vorhandenen Tageslicht geregelt, um den Strombedarf zu minimieren. Das Licht kann zudem manuell ein- und ausgeschaltet sowie optional entsprechend der Außenhelligkeit gedimmt werden.



**Abbildung 5: Alnatura-Arbeitswelt, W-Ansicht; Quelle: The Pk. Odessa Co.**



**Abbildung 6: Blick ins Atrium nach Westen; Quelle: The Pk. Odessa Co.**

## 3.2 Tragwerk und Konstruktion

Dieses Kapitel ist ein Auszug aus [1].

Um ein ressourcenschonendes Gebäude errichten zu können, verglich das Planungsteam in der frühen Entwurfsphase verschiedene Konstruktionsvarianten miteinander.

Die ausgewählten Konstruktionen sollten möglichst wenig Energie für Transport, Herstellung und Demontage verbrauchen, wiederverwertbar sein und gleichzeitig die Einhaltung der Anforderungen an das Raumklima im Gebäudebetrieb garantieren. Da zudem der Wirtschaftlichkeit und der architektonischen Gestaltungsmöglichkeit Rechnung getragen wurde, fand sich mit der Auswahl der Baustoffe Stampflehm, Holz und Stahlbeton ein guter Kompromiss: Insbesondere unter Betrachtung der grauen Energie erwies sich die Außenwand aus Stampflehm als günstig gegenüber Varianten aus Voll- oder Dämmziegeln. Im Vergleich zu Beton- oder Lehmsteinkonstruktionen besitzt das Dachtragwerk aus Holz, einem nachwachsenden Baustoff, Vorteile in der ökologischen Bewertung. Nur die in der Gesamtbilanz positiver bewerteten Decken aus Stahl und Betonhohlkammerteilen tauschte der Bauherr aus Kostengründen gegen Ortbetonkonstruktionen aus. Der Baustoff Lehm kommt in Form von 16 selbsttragenden Fassadenscheiben zum Einsatz, die je 12 Meter hoch und 69 cm stark sind. Im Wechsel mit verglasten Pfosten-Riegel-Konstruktionen bilden die Lehmscheiben die beiden fast 92 Meter langen Längswände im Norden und Süden. Durch die abwechslungsweise Anordnung von offenen und geschlossenen Wandelementen ließen sich aufwendig detaillierte Stürze vermeiden, zudem erleichtert diese klare Trennung den Einsatz von vorgefertigten Elementen. Die Geschossdecken und das Dach verankern die Lehmfassade und dienen zur Lastabtragung von Wind und Erdbeben. Um die Wärmeleitfähigkeit zu verringern, weisen die Lehmelemente einen zweischaligen Wandaufbau mit Kerndämmung aus Schaumglasschotter auf.

Als Haupttragwerk dient ein Stahlbetonskelettbau mit aussteifenden Sanitär- und Treppenhaukernen. Das aussteifend wirkende Untergeschoss aus Stahlbeton trägt die horizontalen Lasten optimal in den Baugrund ab. Entsprechend der Belastung nimmt der Durchmesser der runden Stahlbetonstützen nach oben in jedem Stockwerk ab. Der auf die flexible Nutzung eines Büros ausgelegte Stützenraster folgt im mittleren Feld den geschwungen verlaufenden Geschossdecken, die beidseitig auskragen. Stützweiten zwischen 3,7 und 9,0 Metern erlaubten den Einsatz von Flachdecken mit einer wirtschaftlichen Dicke von 30 cm. Das durchlaufende Oberlicht teilt die Dachfläche in zwei Teile, die statisch unabhängig voneinander funktionieren. Diese konstruktive Herausforderung lösen Brettschichtholz-Träger, die auskragend auf jeweils zwei Stützen aufliegen. Als Dacheindeckung dienen gedämmte, vorgefertigte Dachelemente, die dank der oberseitig schubfest verbundenen OSB-Platten als aussteifende Scheiben wirken.



**Abbildung 7: Errichtungsphase, zweischalige gedämmte Lehmelemente, thermisch aktivierte Innenraumkonstruktion, Holzdach aus Leimbindern; Quelle: Marc Doradzillo**

Während der Bauphase sind die drei wichtigsten Elemente der Konstruktion gut zu sehen: Die Außenwände aus gedämmten, zweischaligen Lehmelementen; im Inneren eine thermisch aktive Stützen-Platten-Konstruktion aus Stahlbeton; das Holzdach aus Leimbindern. Die 384 Stampflehmblöcke wurden zu 12 Meter hohen selbsttragenden Wandscheiben geschichtet. Die Fertigung der Stampflehmfertigteile erfolgte in den ehemaligen Panzerhallen auf dem Gelände, was Transportwege einsparte.

### 3.3 Akustik

Dieses Kapitel ist ein Auszug aus [1].

Trotz der offenen Raumstruktur erzielt der Bürobau eine sehr gute Akustik. Die Eigenschaften des Baustoffs Lehm kommen hier optimal zum Einsatz: Die offenporige Struktur der Stampflehmwand wirkt sich positiv auf die Raumakustik aus. Da die Oberflächen im Innenraum hauptsächlich aus Beton bestehen, haben die Planer zusätzliche Maßnahmen ergriffen: Recycelbare Schaumbetonstreifen in den Stahlbetondecken der Obergeschosse dämpfen Geräusche, ohne die für die Raumklimatisierung benötigte Bauteilaktivierung zu behindern. Einen ähnlichen Effekt zur Schalldämpfung besitzt eine unterseitig in das Dach integrierte Holzlamellendecke ebenso wie die Laibungsverkleidungen aus massivem Eichenholz. Die feingelochte Oberfläche der Treppenhaukerne und die

Einrichtung mit Teppichboden und Akustikvorhängen in den Besprechungsbereichen ergänzen das Konzept.

### 3.4 Brandschutz

Dieses Kapitel ist ein Auszug aus [1].

Die brandschutztechnische Klassifikation der Alnatura-Arbeitswelt stellte im Vorfeld eine große Herausforderung dar. Die äußeren Gegebenheiten lauteten wie folgt: Gebäudegröße > 1.600 m<sup>2</sup>; Gebäudehöhe mit der obersten Fußbodenfläche > 400 m<sup>2</sup>; Nutzungseinheiten in über 7 Metern Höhe; gemischte Nutzung als Büro und Gaststätte. Aufgrund dieser Faktoren wurde der Alnatura-Arbeitswelt die Gebäudeklasse 5 zuteil: unregelmäßiger Sonderbau. Diese Einstufung erforderte eine brandschutztechnische Bewertung auf Grundlage der Landesbauordnung. Da das bauliche Gesamtkonzept der Alnatura-Arbeitswelt strukturell sehr stark von der Bewertung eines Standardgebäudes abweicht, war eine weitere Unterteilung notwendig. Der im Erdgeschoss befindliche Konferenzbereich untersteht zusammen mit den voneinander getrennten Büro- und Sitzungsräumen der Muster-Versammlungsstätten-Verordnung. Der obere Bereich des Gebäudes mit den weitläufigen Raumgefügen, dem Atrium und den Freitreppen ähnelt eher einer Verkaufsstätte als einem Bürogebäude. Somit orientierte sich die Planung für den Brandschutz in diesem Bereich an der Muster-Verkaufsstätten-Verordnung. Im gesamten Gebäude wurde eine flächendeckende Brandmeldeanlage eingebaut. Die oberirdischen Geschosse wurden außerdem mit einer Sprinkler- und Rauchabzugsanlage ausgestattet. Die vier vorgeschriebenen Treppenhäuser sind raumabschließend und feuerwiderstandsfähig ausgeführt. Für den Baustoff Lehm in der nichttragenden Außenwand war lediglich die Eigenschaft „nicht brennbar“ nachzuweisen.<sup>5</sup>

### 3.5 Energiekonzept

Das Ziel des Haustechnik- und Energiekonzepts ist ein hochleistungsfähiges Gebäude mit maximaler natürlicher Belüftung sowie optimiertem Innenraumkomfort und geringem Energieverbrauch. Dies soll möglichst unter Einsatz natürlicher Materialien und Rohstoffe erfolgen.

#### 3.5.1 Lüftung

Der Bürobereich des Gebäudes wird mit unterschiedlichen Lüftungsszenarien natürlich belüftet. Das Erdkanalsystem dient zum einen dem Ansaugen der Luft und zum anderen der Vorkonditionierung der Frischluft für die Alnatura-Arbeitswelt. Die Außenluft wird im Waldbereich angesaugt und strömt in den massiven Baukörper des Erdkanals. Die Außenwände des Erdkanals sind ungedämmt, damit ein Wärmetransfer in das teilweise

feuchte Erdoberfläche stattfinden kann. Dieser Wärmeaustausch an das Erdreich ist erwünscht, um dessen Speichermasse zu nutzen. Durch den Wärmeübergang der Luft an die massiven Wandelemente wird auf diesem Weg im Sommer die Luft abgekühlt und im Winter erwärmt. Die in das Gebäude eintretende Luft lässt sich im Winter zusätzlich über ein Heizregister erwärmen bzw. im Sommer vorkühlen.

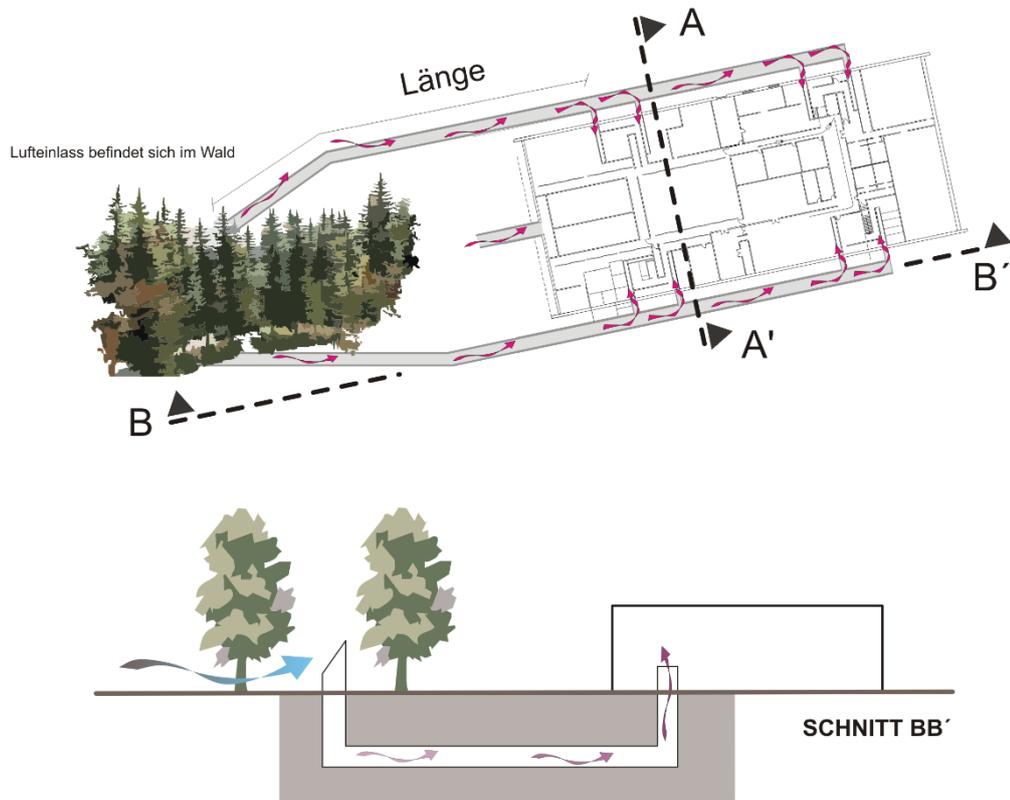


Abbildung 8: Erdkanalsystem in Lageplan und Schnitt

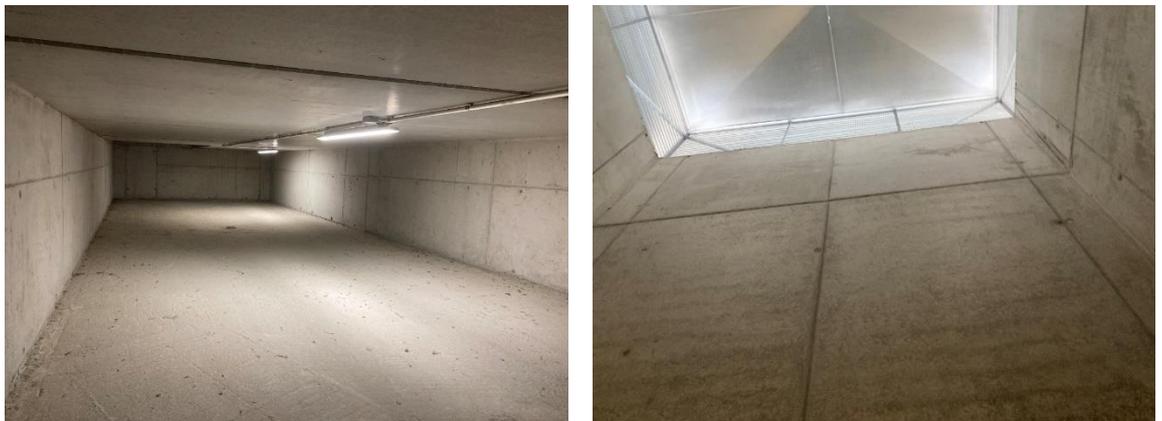


Abbildung 9: Erdkanäle

## Erdkanal

Länge der Erdkanäle:	80-120 m
Querschnitt:	3.4 m <sup>2</sup>
Rohrmaterial:	30 cm Beton
Erdreich:	Erde (feucht)
Luftmenge:	21000 m <sup>3</sup> /h von 8 - 20 Uhr, während der Arbeitswoche

Die Fenster lassen sich ganzjährig öffnen und ermöglichen eine intensive Belüftung der großräumigen Büroetagen zu. Sowohl bei der Lüftung über den Erdkanal als auch über die Fenster wird das Prinzip der Durchlüftung in das offene Atrium genutzt. Im Dach des Atriums sind Lüftungsflügel eingebaut. Thermischer Auftrieb und Winddruck unterstützen die natürliche Luftbewegung im Gebäude. Die Dachöffnungen und die Lüftungsklappen im Erdkanal sind motorisch gesteuert, um die Durchlüftung zu kontrollieren. Dies ermöglicht neben der Option der Durchlüftung am Tag auch die Durchlüftung in den Nachtstunden als Nachtlüftungspülung. Die thermische Masse im Raum wird im Sommer mittels Nachtlüftungspülung abgekühlt und die Kälte tagsüber wieder abgegeben, um den Innenraumkomfort zu optimieren. Ist der natürliche Antrieb nicht ausreichend, kommt zusätzlich ein Lüfter zum Einsatz.

In den Konferenzbereichen an der Fassade zeigen CO<sub>2</sub>-Sensoren die Luftqualität als Ampel. Sie informieren über ein Signal, wenn die Fenster geöffnet werden sollten, um den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft wieder zu senken.

Die innenliegenden abgeschlossene Räume werden über eine mechanische Raumluftanlage versorgt. Die Frischluftansaugung erfolgt über eine dritten Erdkanal mit passiv vorkonditionierter Luft. In den abgeschlossenen Büroräumen wird die Lüftung basierend auf gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum versorgt.



**Abbildung 10: Lüftungszentrale; Quelle: The Pk. Odessa Co.**

### **3.5.2 Heizung**

Wenn weder die passiven Maßnahmen, noch die hochperformante Gebäudehülle (siehe 3.1), oder die intensive Ablüftung während des Betriebs, noch die Nachtlüftung (siehe 3.5.1) ausreichen, kommen ein hocheffizientes Niedertemperaturheizsystem und ein Hochtemperaturkühlsystem in Form einer Wandheizung zum Einsatz. Die Wandheizung ist auf der raumzugewandten Seite der Außen- und Innenwände installiert.



**Abbildung 11: Lehmwand während der Bauphase (links), Lehmwand thermische Aktivierung innen (rechts); Quelle: [www.transsolar.com](http://www.transsolar.com)**



**Abbildung 12: Lehmwand nach Fertigstellung (links), Lehmfassade während Bauphase (rechts);  
Quelle: [www.transsolar.com](http://www.transsolar.com)**

Konvektoren an den vollverglasten Ost- und Westfassaden verhindern einen Kaltluftabfall und versorgen den offenen Luftraum gezielt mit zusätzlicher Wärme bzw. Kälte.

### **3.5.3 Wärme- und Kälteversorgung**

Die notwendige Wärme und Kälte stammt aus erneuerbaren Quellen. Zur Nutzung der regenerativen Potenziale aus dem Erdreich (Erdsonden) dienen reversible Wärmepumpen mit Direktkühlungsoption. Diese werden gleichzeitig zur Erzeugung von Heiz- und Kühlenergie herangezogen. Die effiziente Nutzung der regenerativen Energien erfordert die Wärmeübergabe an den Raum bei sehr niedrigen Temperaturen. Dies ist bei Flächenheizsystemen wie der Wandheizung gegeben. Ebenso bietet diese Kombination für die Kühlung das Potenzial der Direktkühlung aus regenerativen Energiequellen.

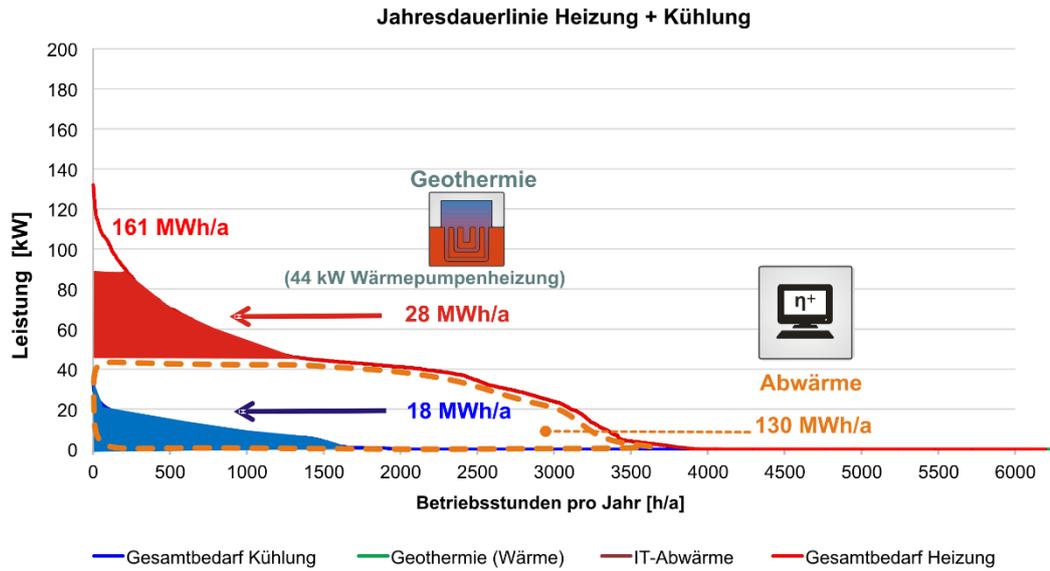
Sondenanzahl: 19

Tiefe: 99 m

Reversible Wärmepumpe:

Wärmepumpe Heizleistung: 80 kW

Wärmepumpe Kühlleistung: 65 kW



**Abbildung 13: Jahresdauerlinie für Heizung und Kühlung mit Abbildung der Wärmeerzeuger**



**Abbildung 14: Heizzentrale; Quelle: The Pk. Odessa Co.**

## 4. Phase 1: Begleitung der Umsetzung mit Bewertung der Prozesse

### 4.1 Integraler Planungsprozess

Der allgemeine Verlauf des Entscheidungsprozesses in dem iterativen, integralen Entwurfsprozesses ist in [4] dargestellt. Der aus dem ersten Forschungsprojekt („Alnatura I“) resultierende Erstentwurf, bei dem die grundlegenden konstruktiven Entscheidungen getroffen wurden, wird nun in diesem Forschungsprojekt („Alnatura II“) bezüglich seiner Materialität konkretisiert.

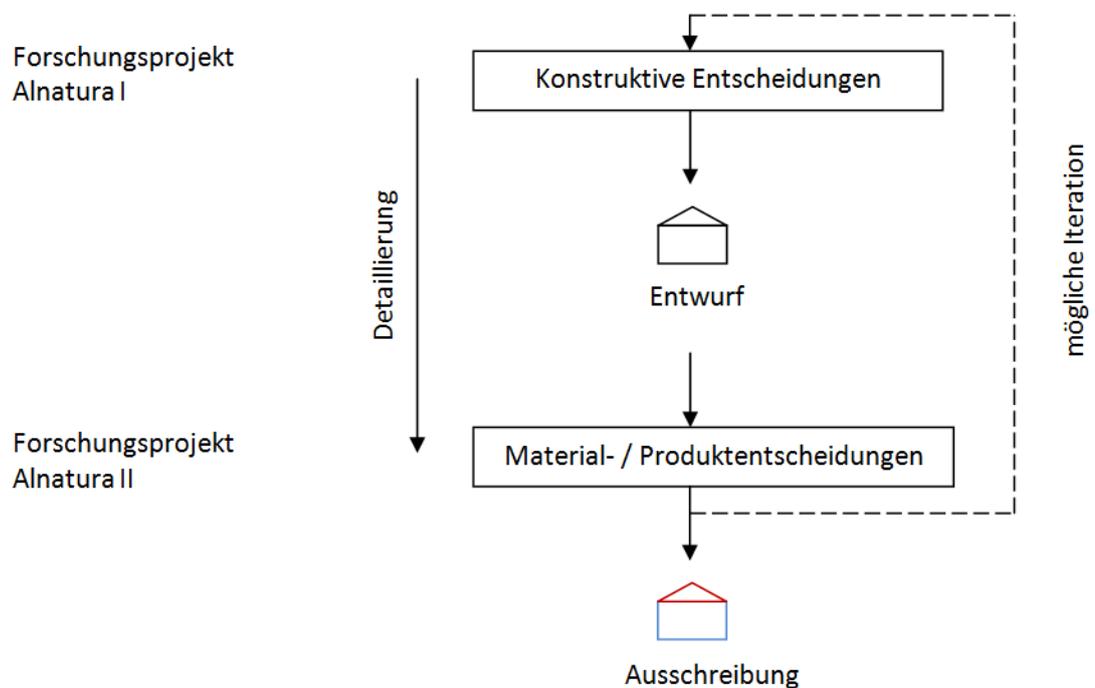


Abbildung 15: Visualisierung des iterativen integralen Entscheidungsprozesses im Zusammenspiel der beiden Forschungsprojekte Alnatura I und II

Im Rahmen der Entwurfsplanung wurden durch teilweise mehrfache Iterationsrunden, die Rahmenbedingungen und Anforderung für die Spezifizierung der Bauteile in der Ausführungsplanung festgelegt und in einem Anforderungskatalog dokumentiert. Im Folgenden Kapitel werden Auszüge aus dem Anforderungskatalog dargestellt.

#### **4.1.1 Anforderung Fassade**

Hinsichtlich der Anforderungen an die Gebäudehülle ist zwischen den opaken und den transparenten Hüllflächen zu unterscheiden. Grundsätzlich werden im Rahmen des Komfortkonzepts Anforderungen an folgende physikalische Eigenschaften gestellt:

- Wärmedämmqualitäten in Form von U-Werten
- Licht- und Energiekennwerte für Glasflächen in Form von Transmissions- bzw. g-Werten
- Luftdichtigkeit von Fenstern, Türen und Festverglasungen
- Abminderungsfaktor  $F_c$  von Verschattungssystemen

Die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle und die Dämmqualität der Bauteile haben entscheidenden Einfluss auf das spätere thermische und akustische Komfortempfinden innerhalb des Gebäudes - insbesondere bei tiefen Außentemperaturen und / oder bei Luv-Lee-seitiger Winddruckbeaufschlagung der unterschiedlichen Fassadenseiten. Zudem bestimmen sie maßgeblich den Heizenergiebedarf des Gebäudes.

#### **Wärmedämmqualität und Wärmebrücken**

Im Falle der opaken Hüllflächen wie erdberührte Außenflächen, Fassaden- und Dachflächen wird auf den EnEV-Nachweis verwiesen. Die hier vorgenommenen Festlegungen zu den U-Werten gelten als Mindestanforderungen, die an die Ausführung der opaken Hüllflächen gestellt werden. Analoges gilt für Wärmebrücken der Hüllkonstruktionen, die auf ein unvermeidbares Maß zu reduzieren sind.

#### **Luftdichtigkeit**

Zur Minimierung der nicht kontrollierbaren Luftin- und exfiltration sowie zur Vermeidung von Strömungsgeräuschen erhält der Haupteingangsbereich des Hauses eine Windfangfunktion. D.h. zu allen benachbarten Räumen ist eine Drehflügel- oder Schiebetür vorgesehen. Damit ist selbst bei temporär offenstehender Eingangstür eine ausgeprägte Querlüftung durch das Gebäude vermeidbar, falls die Verbindungstüren verschlossen sind.

Eine weitere Anforderung betrifft die Entrauchungsvorrichtung des Aufzugsschachts. In der Landesbauordnung sind Voraussetzungen für Fahrschächte von Aufzugsanlagen vorgeschrieben, mit denen diese zu lüften und im Brandfall zu entrauchen sind. Um eine unkontrollierte Entlüftung des Gebäudes zu vermeiden, ist die Entrauchungsklappe im Schachtkopf dauerhaft zu schließen und nur im Brandfall zur Entrauchung zu öffnen.

Eine entsprechende Sensorik und Motorik ist vorzusehen. Herkömmliche Permanentöffnungen jeglicher Art - beispielsweise auch in den "offenen" Kaminen - sind in der Gebäudehülle zu vermeiden.

### **Verglasungen Allgemein**

In Hinblick auf raumklimatische Aspekte werden an die physikalischen Eigenschaften dieser Glasflächen die folgenden Anforderungen gestellt.

- Luftdurchlässigkeit Q100 der Fensterflügel / Lamellenfenster nach EN 12207, Klasse 4 (bei 100 Pa Prüfdruck; maximaler Prüfdruck 600 Pa):  $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$
- Luftdurchlässigkeit Q600 der Festverglasung nach EN 12152, Klasse A4 (bei 600 Pa Prüfdruck):  $< 1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$
- Wärmedurchgangskoeffizient des Fensterrahmens  $U_f$ :  $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Warm-Edge-Randverbund bzw. alternativ auch Edelstahlspacer mit  $\Psi$ :  $0.05 \text{ W}/(\text{m K})$

Die Glasstärken ergeben sich aus statischen und akustischen Gesichtspunkten. Hierzu werden an dieser Stelle keine Angaben gemacht. In Abhängigkeit der Glasstärken, die für die jeweiligen Verglasungsgrößen und Einbausituationen variieren, ergeben sich für die im Folgenden angegebenen Kennwerte zur Lichttransmission und zum Gesamtenergiedurchlassgrad noch mögliche Änderungen. Im Falle der U- und g-Werte sind die Angaben als Maximalwerte zu verstehen. Der Gesamtenergiedurchlassgrad bezieht sich stets auf die Verglasung ohne Rahmen.

Hinsichtlich der schalltechnischen Anforderungen an die Verglasungen sind die Vorgaben der akustischen Bauphysik einzuhalten.

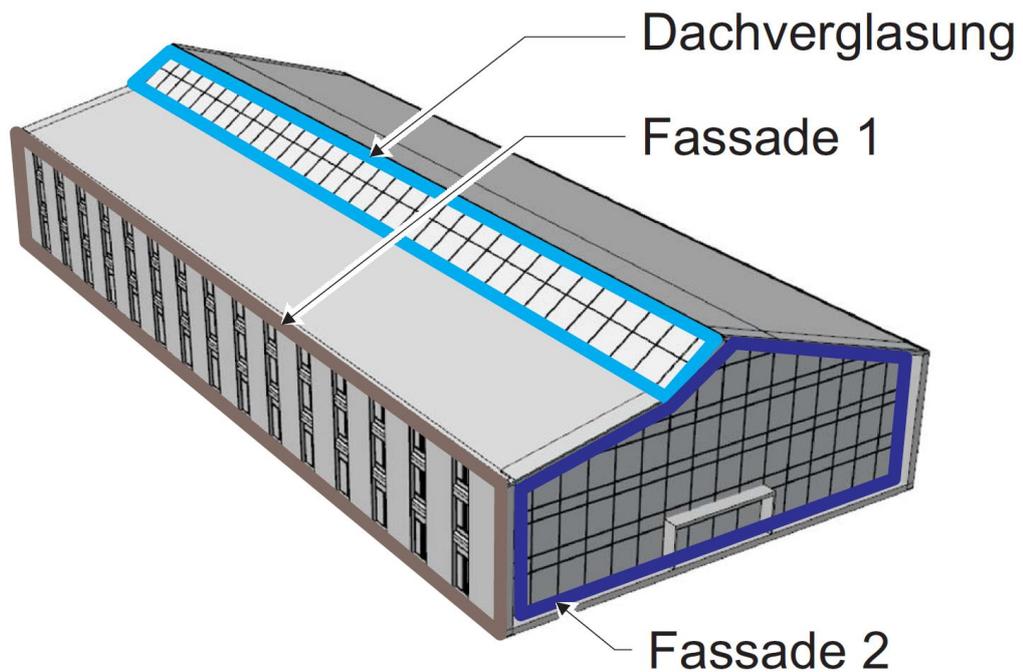


Abbildung 16: Verortung der Verglasungen in Dach und Fassaden

### Dachverglasungen

Die Dachverglasungen sind als öffenbare Fensterelemente nach der ASR 3.6 auszuführen – optional als Lamellenfenster – beispielsweise mit dem System bigAir Lacker Lamelle. In Hinblick auf raumklimatische Aspekte werden an die physikalischen Eigenschaften dieser Glasflächen die folgenden Anforderungen gestellt.

- 3-fach Sonnenschutzglas mit dem Edelgas Argon gefüllt
- Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach EN 410: 29 %
- Wärmedurchgangskoeffizient des Glases Ug-Wert nach EN 673: 0.7 W/(m<sup>2</sup> K)
- Tageslichttransmission des Glases nach EN 410: 58 %
- Rahmenanteil: 20%

### Fassade 1 - Südost und Nordwest

Diese Verglasungen sind entsprechend nach der ASR 3.6 als öffenbare Fensterelemente auszuführen. In Hinblick auf raumklimatische Aspekte werden an die physikalischen Eigenschaften dieser Glasflächen die folgenden Anforderungen gestellt:

- 3-fach Sonnenschutzglas mit dem Edelgas Argon gefüllt
- Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach EN 410: 52 %
- Wärmedurchgangskoeffizient des Glases Ug-Wert nach EN 673: 0.6 W/(m<sup>2</sup> K)
- Tageslichttransmission des Glases nach EN 410: 70 %
- Rahmenanteil: 30%

### **Fassade 2 - Südwest und Nordost**

Diese Verglasungen sind entsprechend nach der ASR 3.6 als öffnenbare Fensterelemente auszuführen. In Hinblick auf raumklimatische Aspekte werden an die physikalischen Eigenschaften dieser Glasflächen die folgenden Anforderungen gestellt.

- 3-fach Sonnenschutzglas mit dem Edelgas Argon gefüllt
- Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach EN 410: 29 %
- Wärmedurchgangskoeffizient des Glases Ug-Wert nach EN 673: 0.6 W/(m<sup>2</sup> K)
- Tageslichttransmission des Glases nach EN 410: 58 %
- Rahmenanteil: 20%

Wichtig: Die verwendeten Gläser und Beschichtungen sind durch die Architektur zu bemustern und freizugeben.

#### **4.1.2 Anforderung Sonnenschutz**

Die Glasflächen in der Gebäudehülle benötigen einen Sonnenschutz. Je nach Fassadenorientierung wird ggfs. ein manueller oder motorischer Sonnenschutz vorgesehen, dessen Funktion strahlungsabhängig gesteuert ist. Der Sonnenschutz ist durch folgende Eigenschaften definiert:

- Abminderungsfaktor Fassade 2,  $F_c = 0.1$ , außenliegender motorisch geregelter Sonnenschutz
- Belegungsanteil der Fassade 2 entsprechend Abbildung 17



**Abbildung 17: Belegungsanteil Südwestfassade**

- Windstabilität bis zu einer bestimmten Windgeschwindigkeit ist mit dem Hersteller abzustimmen und entsprechend in der Regelung des Sonnenschutzes vorzusehen um eine Schädigung des Sonnenschutzes zu vermeiden.
- Abminderungsfaktor Dachverglasung,  $F_c = 0.65$ , innen liegender motorisch geregelter Sonnenschutz
- Abminderungsfaktor Fassade 1,  $F_c = 0.2$ , außenliegender manueller Sonnenschutz

**Wichtig:** Bei ausschließlich manueller Steuerung des außenliegenden Sonnenschutzes ist besonders darauf zu achten dass die Nutzer einen Warnhinweis bekommen und rechtzeitig den Sonnenschutz hochfahren bevor es durch Wind zur Beschädigung des Sonnenschutzes kommt. Für allgemeine Verkehrswege entlang der Fassade ist auch zu empfehlen, dass ein motorisch betriebener Sonnenschutz vorgesehen wird um einen unnötigen Wärmeeintrag zu vermeiden.

### **Steuerung des motorischen Sonnenschutzes**

In der Heizperiode sollen passive, solare Gewinne zur Gebäudeheizung beitragen. Zudem ist in dieser Jahreszeit die Gefahr der Raumüberhitzung gering bzw. können überschüssige solare Lasten leicht wieder natürlich abgelüftet werden. Die saisonale Freigabe für die automatische Sonnenschutzsteuerung wird mit Hilfe des 24 h-Mittelwertes der Außenlufttemperatur ermittelt.

Überschreitet dieser Wert einen frei einstellbaren Schwellenwert, wird dies als Freigabe für die Sonnenschutzsteuerung gewertet.

### **Betriebsüberwachung und Steuerung**

Die Steuerung erfolgt in Abhängigkeit von der Außenbeleuchtungsstärke gemessen in der Fassadenebene. Hierfür wird ein Grenzwert vorgegeben. Wird dieser Grenzwert überschritten, kommt es zur Sonnenschutzaktivierung. Mit Hilfe des vorzugebenden

Windgrenzwertes, wird der Sonnenschutz vor Beschädigung geschützt. Zur Maximierung der passiven solaren Gewinne im Winter und der dadurch entstehenden Reduktion des Heizbedarfs ist eine saisonale Schaltung vorgesehen.

Die Ein- und Ausschaltkriterien sind mit einer ausreichenden Hysterese zu versehen, um die Steuerung zu stabilisieren. Ein Zeitglied vermeidet zu häufiges Hoch- und Herunterfahren der Behänge. Der Nutzereingriff ist jederzeit möglich – mit Ausnahme bei einer windbedingten Aktivierungsverriegelung.

**Wichtig:** Alle Eingabeparameter sind auf der Leitebene frei einstellbar. Somit sind Steuerkriterien, falls sie sich im Betrieb nicht bewähren, anpassbar bzw. neutralisierbar. Die Steuerung des außenliegenden Sonnenschutzes erfolgt nach dem unten abgebildeten Schema. Für den Sonnenschutz an der Dachverglasung kann das Schema analog ohne Windabschaltung angesetzt werden.

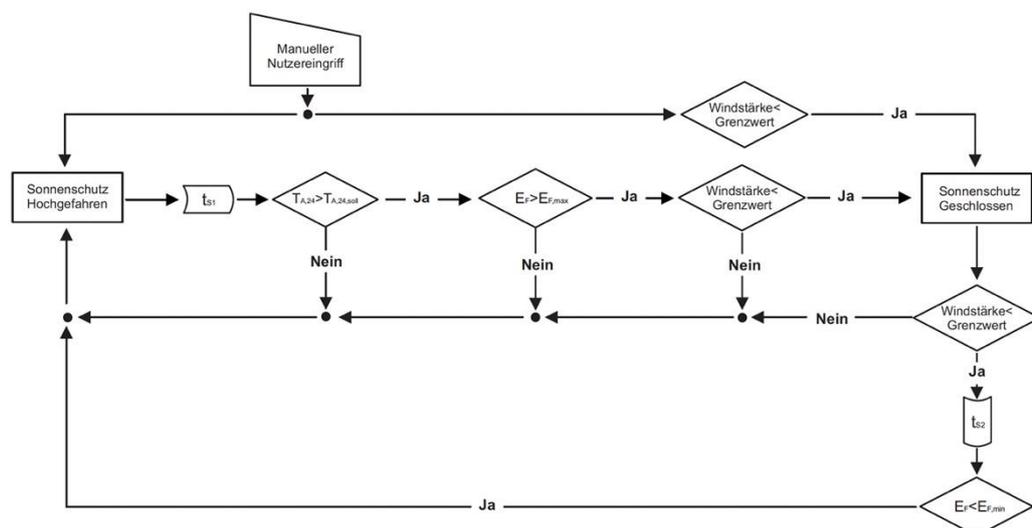


Abbildung 18: Steuerschema motorisch gesteuerter Sonnenschutz (außen)

## Legende

- EF            Außenbeleuchtungsstärke in Fassadenebene
- EF, max     Außenbeleuchtungsstärke in Fassadenebene, ab der der Sonnenschutz geschlossen wird; frei einstellbar; Startwert = 20'000 lx
- EF, min     Außenbeleuchtungsstärke in Fassadenebene, ab der der Sonnenschutz hochgefahren wird; frei einstellbar; Startwert = 15'000 lx mit Hysterese

tS1	Zeitglied 1: Bedingungen werden von 5 Uhr morgens bis zur Sonnenschutzaktivierung kontinuierlich überprüft, danach nur in festen Zeitintervallen; frei einstellbar; Startwert = 8h
tS2	Zeitglied 2: Bedingungen werden von 5 Uhr morgens bis zur Sonnenschutzaktivierung kontinuierlich überprüft, danach nur in festen Zeitintervallen; frei einstellbar; Startwert = 8h
TA,24	mittlere Außenlufttemperatur aus den letzten 24h
TA,24,soll	Schaltwert der mittleren Außenlufttemperatur, Startwert: 12°C

### **Windstärke, Grenzwert:**

Bei Extremwind ist der Sonnenschutz vor Zerstörung zu schützen. Der Grenzwert ist vom Sonnenschutzlieferanten vorzugeben; die Sonnenschutzaktivierung sollte jedoch bis zu mindestens 16m/s Windgeschwindigkeit möglich sein.

**Wichtiger Hinweis:** Das Hinzufügen eines Zeitprogramms in das Regelschema wie Nutzungszeit, Nacht etc. wird vorausgesetzt.

### **4.1.3 Anforderung Kunstlicht**

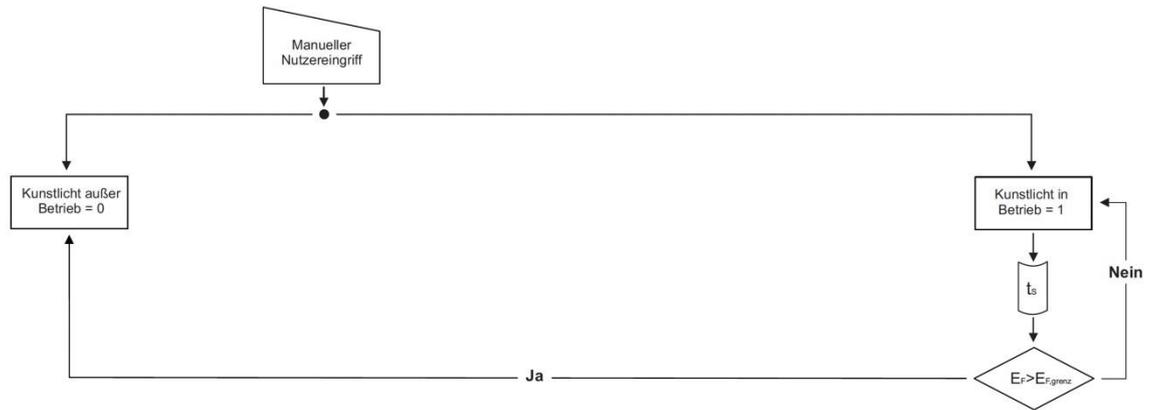
#### **Steuerung**

Das Kunstlicht am Arbeitsplatz wird individuell vom Nutzer gesteuert. Die allgemeine Beleuchtung von Verkehrsflächen, etc. wird nach gewissen Zeiten von einer zentralen Steuerung zurückgesetzt um in den idealen Betriebszustand zu wechseln.

#### **Betriebsüberwachung und Steuerung**

Die Steuerung erfolgt primär manuell und wird in Abhängigkeit von der Außenbeleuchtungsstärke gemessen und in horizontaler Ebene nach einem Zeitglied überschrieben. Hierfür wird ein Grenzwert vorgegeben. Wird dieser Grenzwert überschritten, kommt es zur Ausschaltung des Kunstlichts in allgemeinen Nutzungsbereichen. Ein Zeitglied vermeidet zu häufiges Ausschalten des Kunstlichts. Der Nutzereingriff ist jederzeit möglich.

**Wichtig:** Alle Eingabeparameter sind auf der Leitebene frei einstellbar. Somit sind Steuerkriterien, falls sie sich im Betrieb nicht bewähren, anpassbar oder neutralisierbar. Die Steuerung des Kunstlichts von zentralen Bereichen erfolgt nach folgendem Schema:



**Abbildung 19: Steuerschema Kunstlichtbetrieb**

### Legende

- EF            Außenbeleuchtungsstärke in hor. Ebene
- EF,grenz    Außenbeleuchtungsstärke in hor. Ebene, ab der der Kunstlichtbetrieb abgeschaltet wird; frei einstellbar; Startwert = 40'000 lx
- EF,min      Außenbeleuchtungsstärke in hor. Ebene, ab der der Sonnenschutz hochgefahren wird; frei einstellbar; Startwert = 15'000 lx mit Hysterese
- tS1          Zeitglied : Bedingungen werden von 8 - 22 Uhr in einem Zeitintervall überprüft; Startwert = 1h

**Wichtiger Hinweis:** Das Hinzufügen eines Zeitprogramms in das Steuerschema wie Nutzungszeit, Nacht etc. wird vorausgesetzt.

## Thermische Masse

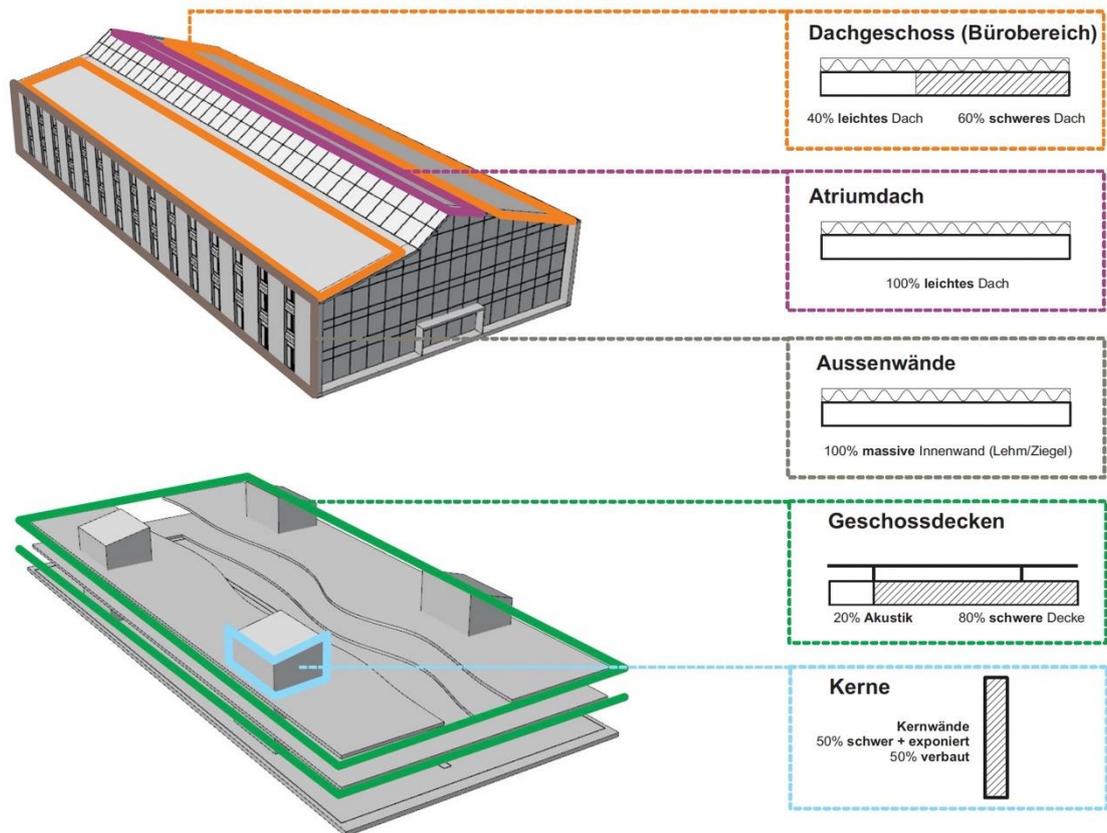


Abbildung 20: Thermische Masse verschiedener Bauteile

### 4.1.4 Anforderung Lüftung

Es sind die Anforderungen hinsichtlich der ASR 3.6 an die geometrischen Lüftungsquerschnitte in der Fassade einzuhalten. Dabei ist zwischen einseitig belüfteten und quergelüfteten Bereichen entsprechend zu unterscheiden. Bei einer Querlüftungsmöglichkeit ist die entsprechende Anforderung der ASR 3.6 an den geometrischen Lüftungsquerschnitt zu gleichen Teilen auf die vertikale Fassade und die Luftauslässe im Dachoberlicht zu verteilen.

### Anforderungen an das Erdkanalsystem

Um eine natürliche Durchlüftung des Erdkanals zu begünstigen wird empfohlen den Druckverlust im gesamten Luftweg auf  $< 7\text{Pa}$  auszulegen. Für die Zeiten außerhalb der Gebäudenutzungszeit ist eine Möglichkeit vorzusehen den Luftdurchsatz abzuschalten um zum Beispiel in einer kalten Winternacht den Energieverlust zu minimieren.

Die Luftauslässe sind bevorzugt Quellluftauslässe. Dabei ist die Ausströmfläche des Quellluftsystems so auszulegen, dass die Luftgeschwindigkeit im Luftauslass  $0.3\text{ m/s}$

(bezogen auf das Auslassgitter) nicht überschreitet. Ein Wert von 0.1 m/s ist anzustreben. Die Auslässe sind mit ausreichendem Abstand (0.6 m) zu den Sitz- und Arbeitsplätzen so anzuordnen, sodass Zugerscheinungen für den Nutzer ausgeschlossen sind.

**Wichtig:** Zu- und Abluftzonen sind durch Überströmöffnungen miteinander zu verbinden. Kann eine Zuluftzone von der dazugehörigen Abluftzone durch eine Tür getrennt werden, befindet sich zwischen beiden Zonen ein ausreichend dimensioniertes Überströmelement. Auf ein ausreichendes Schalldämmmaß sowie auf einen minimierten Druckverlust wurde geachtet.

### Belüftungsszenarien der Bürobereiche mit Atrium

Die Alnatura-Arbeitswelt wird während der Nutzungszeit über den Erdkanal in Abhängigkeit der Innenluftqualität belüftet. Bei schlechter Luftqualität gehen Öffnungsklappen im Dachbereich auf und lassen dadurch einen Luftdurchsatz zu. Nutzer der Bürobereiche können gleichzeitig Fenster an der Fassade öffnen um lokal Einfluss auf die Durchlüftung zu nehmen. Das Erdkanalsystem wird ebenfalls verwendet um eine automatische Nachtlüftung zu ermöglichen. In Abhängigkeit der Jahreszeit wird dadurch die thermische Masse des Gebäudes in den Nachtstunden abgekühlt und bietet tagsüber eine passive Kühlung. In Zeiten in denen der Luftdurchsatz rein durch natürlichen Antrieb nicht ausreichend ist kann optional ein Lüfter zugeschaltet werden, um die Durchlüftungsmenge zu erhöhen. Die Regelungsszenarien des Erdkanals sind in Abbildung 21 dargestellt.

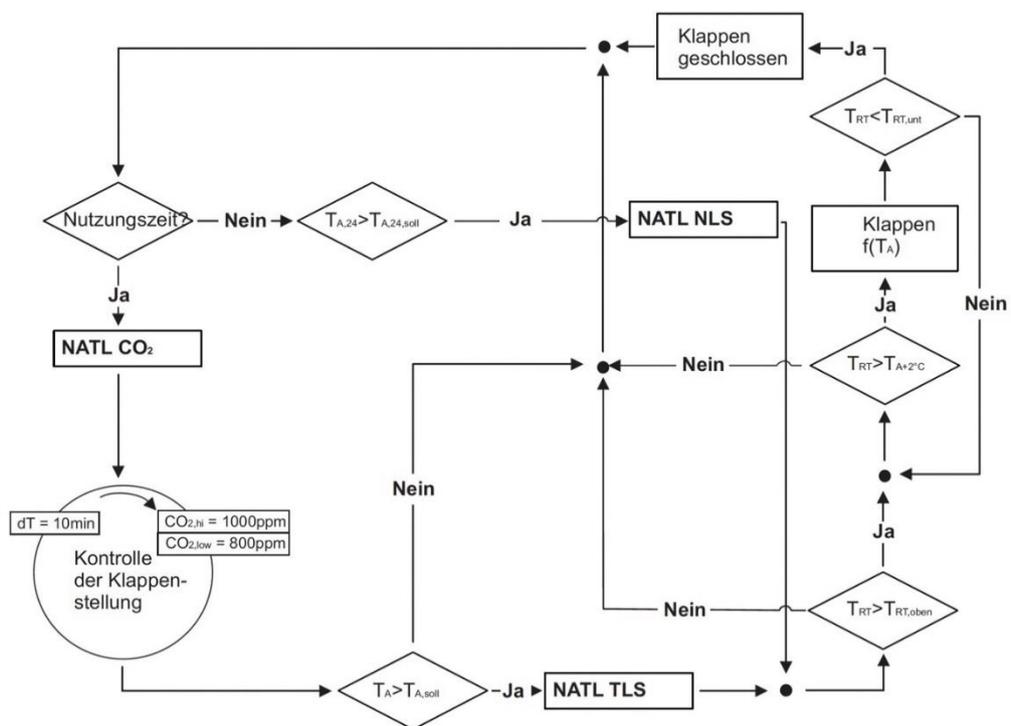


Abbildung 21: Regelschema Lüftung

## Legende

Nutzungszeit	frei einstellbarer Zeitraum, Startwert: Beginn = 8 Uhr, Ende = 20 Uhr
NLS	Nachluftspülung (höherer Luftdurchsatz außerhalb der Nutzungszeit, Klappen vollständig geöffnet)
TLS	Tagluftspülung (höherer Luftdurchsatz während der Nutzungszeit, Klappen vollständig geöffnet)
TRT	Raumtemperatur (gemittelter Temperaturwert übergeben aus den Sensoren pro Regelzone)
TA	Außenlufttemperatur
TRT,oben	oberer Grenzwert der Raumtemperatur, Startwerte: Nachluftspülung = 23°C, Tagluftspülung = 24°C
TRT,unt	unterer Grenzwert der Raumtemperatur, Startwerte: Nachluftspülung = 18°C, Tagluftspülung = 22°C
TA,24	mittlere Außenlufttemperatur aus den letzten 24h
TA,24,soll	Schaltwert der mittleren Außenlufttemperatur, Startwert: 12°C
TA,soll	Schaltwert der Außenlufttemperatur ab der eine Tagluftspülung freigegeben wird, Startwert = 10°C
f(TA)	Stufenweises öffnen und schließen einzelner Klappen um die Innenraumluftqualität zu kontrollieren
dt	Zeitintervall nachdem die Luftqualität neu überprüft wird

### Wichtig:

Das Hinzufügen eines Zeitprogramms in das Regelschema wie Arbeitszeit, Wochenende etc. wird vorausgesetzt.

Alle Eingabeparameter sind auf der Leitebene frei einstellbar. Somit sind Steuerkriterien, falls sie sich im Betrieb nicht bewähren, anpassbar bzw. neutralisierbar. Sofern die Lüftungsöffnungen im Regen- oder Windfall geschlossen werden müssen ist dies entsprechend in der Regelung zu berücksichtigen

#### **4.1.5 Anforderung Wandheizung**

##### **Thermisch aktivierte Bauteile TAB in den Wandkonstruktionen**

Die thermisch aktivierten Wände dienen der aktiven Heizung unter Einbindung eines Wärmepumpensystems und der Raumkühlung direkt über das Kühlpotential der Geothermie. Bedingt durch die Bauteilfunktion sind die Wände zur Raumluft freiliegend. Wandabhängungen bzw. Überdeckungen mit zum Beispiel Akustikputzen vermindern die Übertragungsleistungen und sind daher zu vermeiden.

**Wichtig:** Spätere Bohrungen in diese Wände sind hinsichtlich der Bohrtiefe auf den Abstand zwischen Wandinnenkante und TAB-Verlegeebene anzupassen. In diesem Zusammenhang sind unbedingt die vorliegenden Bautoleranzen zu berücksichtigen. Bei Nicht-Beachtung droht die Beschädigung einzelner in die Wände integrierter Kunststoffleitungen, was hinsichtlich der thermischen Raumfunktion nicht zu tolerieren ist.

##### **Allgemeine Ausführungsvorgaben zur Wandtemperierung**

Vor der Bauausführung der TABs muss seitens des Auftragnehmers eine detaillierte Montageplanung erstellt werden, die durch den GP vor der Ausführung freizugeben ist. Die Belegung und der Einbau von Kunststoffrohren zur Kühlung und Beheizung der Wände erfolgt laut folgender Beschreibung:

In den Wandaufbau werden Rohrleitungen aus hochdruckvernetztem Polyethylen (PEX-A-Rohr nach DIN 16892/93 und DIN 4729, sauerstoffdicht nach DIN 4726) eingelegt, wie sie aus der Wandheizungs/-kühlungs - Technologie her bekannt sind. Der Hersteller der diffusions- und sauerstoffdichten Kunststoffrohre – beispielsweise Polytherm, Velta, Rehau - übernimmt eine 10- jährige Dichtigkeitsgarantie für das Kunststoffrohr.

Das zu verwendende Kunststoffrohr besitzt einen Außendurchmesser von 14 mm bei einer Wandstärke von ca. 2 mm. Die Rohrleitungen werden gemäß der mit einem horizontalen Verlegeabstand von max. 15 cm verlegt. Diese Angabe gilt auch als Abstand zwischen den Außenrohren benachbarter Register.

##### **Regelung des Thermoaktiven Bauteils (TAB) - Wandheizung / -kühlung**

Die saisonale Freigabe für den möglichen TAB-Betrieb im Gebäude wird mit Hilfe des 24 h- Mittelwertes der Außenlufttemperatur ermittelt. Überschreitet dieser Wert einen frei einstellbaren Schwellenwert, wird dies als Freigabe für die TAB-Kühlung im Gebäude gewertet, anderenfalls wird der Heizbetrieb freigegeben.

**Wichtig:** Der Gebäudekühlmodus schließt den Heizbetrieb in den Räumen aus.

## Regelkreise

Die Regelung des TAB-Betriebs erfolgt soweit möglich raumspezifisch. Falls dies einzelne Kreisteilungen nicht zulassen, werden die Räume hinsichtlich des TAB-Betriebs in Zonen zusammengefasst – also auch deren Wandtemperaturen. Voraussetzung hierfür sind eine vergleichbare Raumnutzung sowie zeitgleiche und vergleichbare Solarlasten.

## Betriebsüberwachung und Regelung

Zur Betriebsüberwachung wird für jeden der genannten Regelkreise mit TAB die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur des TAB-Kühlkreises als Regelgröße angesetzt. Eine Betriebsüberwachung in Abhängigkeit von der Außenfeuchte findet ebenfalls statt, um bei geöffneter Fassade Kondensat an der Wand auszuschließen.

Der TAB-Regelkreis wird zur Kühlung in Betrieb genommen, wenn die Raumlufttemperatur einen oberen Grenzwert überschreitet, umgekehrt im Heizfall. Die TAB wird wieder deaktiviert, wenn die Raumlufttemperatur einen unteren Grenzwert unterschreitet.

Die Ein- und Ausschaltkriterien werden mit einer ausreichenden Hysterese versehen, um das Speichervermögen der Massivwände zu berücksichtigen.

**Wichtig:** Alle Eingabeparameter sind auf der Leitebene frei einstellbar. Somit sind Regelkriterien, falls sie sich im Betrieb nicht bewähren, anpass- bzw. neutralisierbar.

Die Regelung der TAB erfolgt nach folgenden Schemen.

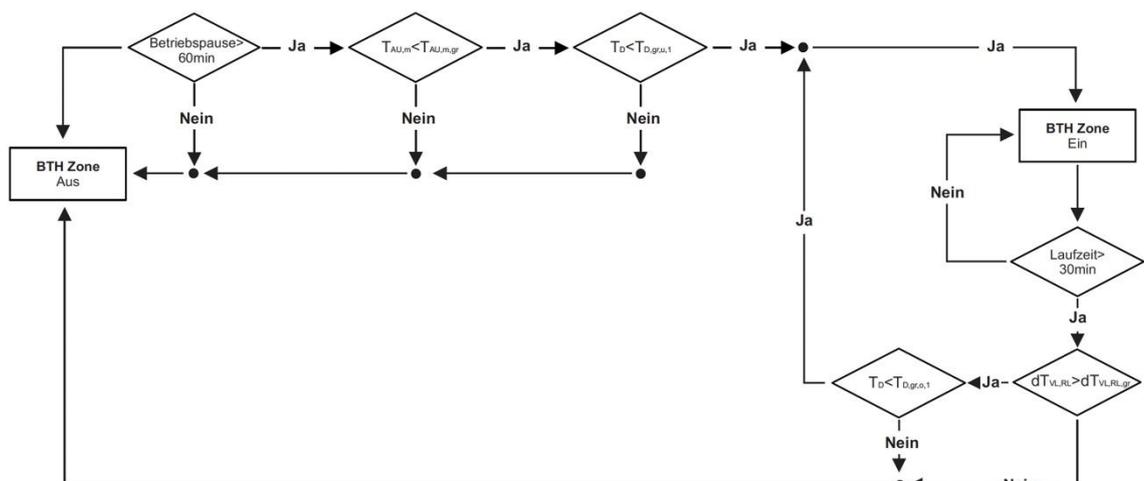


Abbildung 22: Regelschema Bauteilheizung

## Legende

BTH Bauteilheizung

TAU,m Gleitender 24 Stunden-Mittelwert der Außentemperatur

TAU,m,gr Grenzwert des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur, Startwert = 5°C

TD Aktueller Messwert der Raumtemperatur (Mittelwert je Regelzone)

TD,gr,u,1 Unterer Grenzwert 1 bei der Bauteilheizung einschaltet; frei einstellbar, Startwert = 20.5°C

TD,gr,o,1 Oberer Grenzwert 1 bei der Bauteilheizung ausschaltet; frei einstellbar, Startwert = 21.5°C

dTVL,RL Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf (TVL-TRL)

dTVL,RL,gr Mindesttemperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf, Startwert = 2K

**Wichtiger Hinweis:** Das Hinzufügen eines Zeitprogramms in das Regelschema wie Arbeitszeit, Wochenende etc. wird vorausgesetzt.

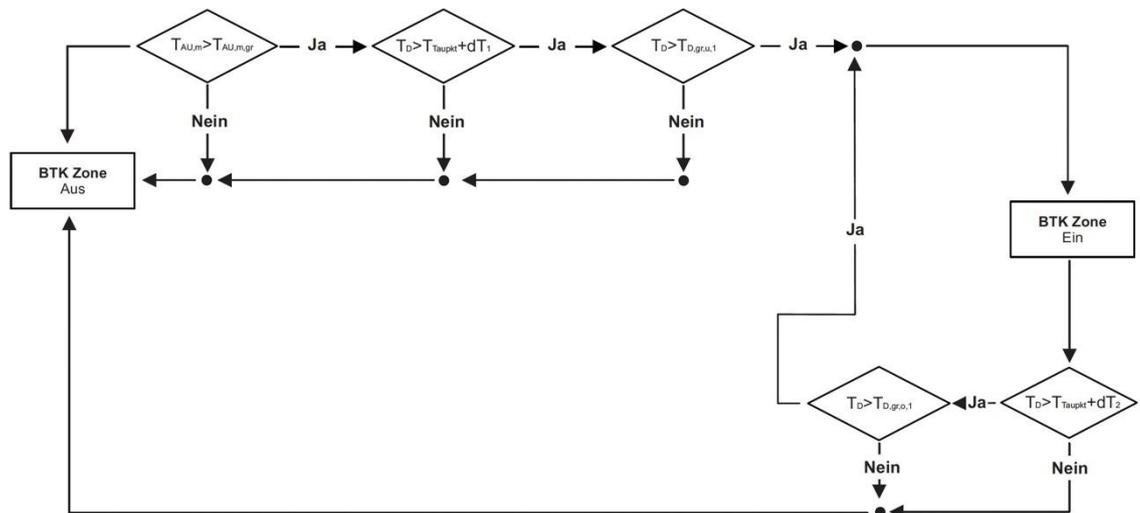


Abbildung 23: Regelschema Bauteilkühlung

## Legende

BTK	Bauteilkühlung
TAU,m	Gleitender 24 Stunden-Mittelwert der Außentemperatur
TAU,m,gr	Grenzwert des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur; Startwert = 12°C
Ttaupkt	Taupunkttemperatur der Außenluft
dT1	Temperaturdifferenz 1 zur Taupunkttemperatur; frei einstellbar; Startwert = 1K
dT2	Temperaturdifferenz 2 zur Taupunkttemperatur; frei einstellbar; Startwert = 2K
TD	Aktueller Messwert der Raumtemperatur
TD,gr,u,1	Unterer Grenzwert 1 bei der Bauteilkühlung einschaltet; frei einstellbar; Startwert = 24°C
TD,gr,o,1	Oberer Grenzwert 1 bei der Bauteilkühlung ausschaltet; frei einstellbar; Startwert = 22°C

**Wichtiger Hinweis:** Das Hinzufügen eines Zeitprogramms in das Regelschema wie Arbeitszeit, Wochenende etc. wird vorausgesetzt. Die Überprüfung der Taupunkttemperatur ist nur dann erforderlich, wenn eine Kälteeinspeisung mittels einer Kältemaschine o. ä. erfolgt.

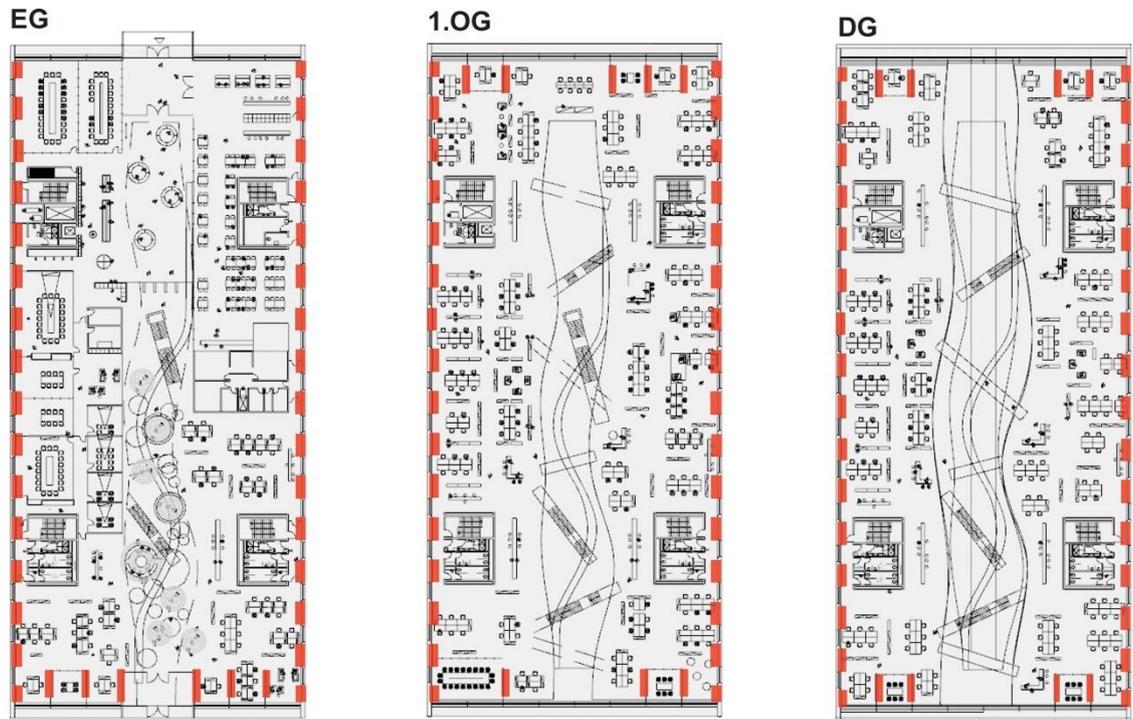
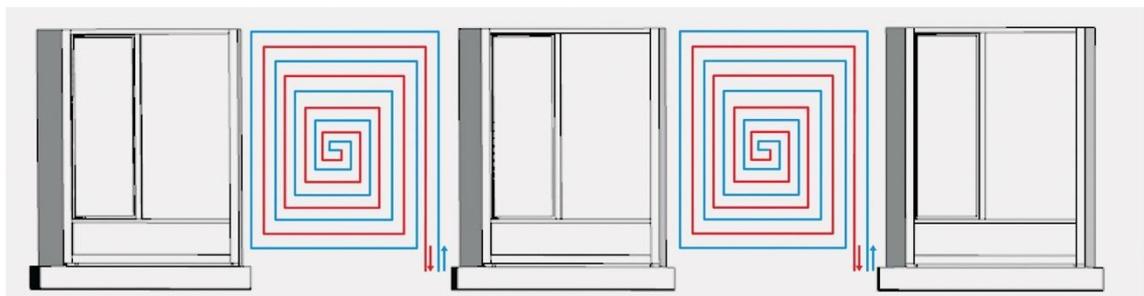


Abbildung 24: Thermisch aktivierte Wandflächen



Beispiel Belegung der Wandflächen

Abbildung 25: Schematische Belegung zweier Wandflächen mit Heizungsrohren

### Wandheizung (Aufbau)

Die hier aufgeführten Werte sind eine Empfehlung gemäß der Gebäudesimulation. Alternative Systeme können entsprechend bei gleicher Leistungsfähigkeit eingesetzt werden. Die Dämmschichtdicke ist nach EnEV bzw. nach Abstimmung mit der Bauphysik vorzusehen. Für das Erzielen einer maximalen Leistung ist dieser minimale Abstand einzuhalten. Die Rohre sind in Hinblick auf einen optimalen Wärmeübergang zwischen Rohr / Massivwand rundum schlüssig im Wandputz zu verlegen.

## Aktive Flächen

Siehe rot markierte Wände in Abbildung 24 Der Belegungsanteil ist min. 75% der Flächen.

## Rohr

Typ PEX-A 14x2

Außendurchmesser = 0.014 m

Wandstärke = 0.002m

Verlegeabstand = 0.15m

Überdeckung = max. 6 cm (zum Innenraum)

## Heizung

Fluidmassenstrom = 12 kg/(h.mÇ)

Vorlauftemperatur = f(Taussen) aber max. 40°C

## Kühlung

Fluidmassenstrom = 12 kg/(h.mÇ)

Vorlauftemperatur = f(Tsonden) aber min. 18°C

Die Kreislängen sollten mit 100 – 120 m Länge möglichst einheitlich sein, wobei die maximale Längendifferenz zwischen den einzelnen Registern +/- 10 % zu betragen hat. Die Kreislänge zählt ab dem Verteiler. Der maximale Druckverlust in den einzelnen Kreisen sollte inklusive der Armaturen einen Grenzwert von 20'000 Pa nicht überschreiten.

### 4.1.6 Anforderung technische Gebäudeausrüstung

Zur Darstellung einer effizienten und funktionalen Technischen Gebäudeausrüstung werden an die Ausführung aller Komponenten einige grundlegenden Anforderungen gestellt:

- Alle Heiz- und Kaltwasserverteilnetze sind hydraulisch auszulegen und einzuregulieren; entsprechende Berechnungen sind nachzuweisen; wo möglich sollen die Netze nach dem Tichelmann-Prinzip aufgebaut werden; an allen dezentralen Abnehmern muss die Ventilautorität gewährleistet sein.

- Die offiziellen Nachweise für den Wärmebedarf und die Kühllasten sind raumweise zu führen und nachzuweisen; alle Raumsysteme sind basierend auf diesen Berechnungen auszulegen; die thermischen Simulationen ersetzen die offiziellen Nachweise nicht.
- Alle wesentlichen Wasser-Wasser-Wärmetauscher sind auf eine Grädigkeit von 1 Kelvin auszulegen – insbesondere diejenigen, die für die „freie Kühlung“ eingesetzt werden; der wasserseitige Druckverlust im Wärmetauscher ist auf maximal 20'000 Pa zu begrenzen; die Anzahl an seriellen Wärmetauschern zwischen Verbraucher und Wärme- / Kältequelle ist zu minimieren.
- Der Gesamtdruckverlust der Erdkanallüftung inklusive Kanalnetz und ggfs. Lüftungsaggregat ist auf  $< 7$  Pa zu begrenzen; in diesem Zusammenhang ist auf kurze Transportwege, kleine Strömungsgeschwindigkeiten und strömungsgünstige Formgebungen zu achten; zu einer fachgerechten Dimensionierung gehört eine Druckverlustberechnung für das gesamte Luftkanalnetz.
- Die Anzahl aller Heizkreis- und Umwälzpumpen ist zu minimieren; alle Pumpen zeigen die notwendigen Leistungsdimensionen und sind sinnvollerweise drehzahl geregelt bzw. besitzen zumindest die notwendigen Leistungsstufen der anfallenden Betriebsmodi; alle Pumpen sind nach Energieeffizienzklasse A gelabelt und zeichnen sich durch einen Energieeffizienz-Index (EEI)  $\leq 0.23$  aus; der Pumpenantrieb erfolgt durch EC-Motoren.
- Innerhalb des Gebäudes: Der Wärmestrom sämtlicher Luftkanäle, Rohre, wasserführende Leitungen (bspw. die Soleleitung) und Geräte mit der Umgebung muss auf maximal 5 W/mK begrenzt bleiben; die Wärmedämmung ist dampfdicht – d.h. Art und Konstruktion der Wärmedämmung muss innerhalb der Konstruktion und auf der Oberfläche Kondensation vermeiden; die Wärmedämmung muss vor mechanischer Beschädigung geschützt sein; die Reinigung von Lüftungskanälen muss auch mit der Wärmedämmung gut möglich sein; die Wärmedämmung zeichnet sich bei Herstellung, Anwendung und Entsorgung durch eine geringe Umweltbelastung aus.
- Kondensation an allen Raumkühlsystemen ist mit Sicherheit auszuschließen.

#### **4.1.7 Anforderung Energieerzeugung**

Das Hydrauliksystem Energieerzeugung Wärme und Kälte besteht im Wesentlichen aus:

- Abwärmenutzung aus dem Rechenzentrum
- Wärmepumpe Geothermie
- Pufferspeicher Heizung
- Pufferspeicher Kühlung (optional)
- Solesondenkreise mit Wärmetauscher „Freie Kühlung“
- Gaskessel

Folgende Betriebsmodi werden hinsichtlich der Wärme- und Kälteerzeugung unterschieden:

### **Abwärmenutzung aus dem Rechenzentrum**

Die anfallende Abwärme des Rechenzentrums wird in den Heizkreis des Gebäudebetriebs eingespeist um einen Teil des Wärmebedarfs zu decken. Die Anbindung erfolgt über den Pufferspeicher des Heizsystems. Die Nutzung der Abwärmeeinspeisung zur Deckung des Gebäudeheizbedarfs ist bevorzugt anzusetzen.

### **Wärmepumpe mit Geothermie**

Die Vorlauftemperatur der Heizkreise – Wandheizung - wird in Abhängigkeit von der Außentemperatur ermittelt. Die restlichen Heizkreis - Vorlauftemperaturen der Küche und Lüftung sind konstant. Bei Wärmeanforderung der Heizkreise wird die Wärme durch den Pufferspeicher bereitgestellt. Neben der Abwärmenutzung wird bei einer Leistungsbedarfsunterdeckung die Wärmepumpe dazu geschaltet. Die Wärmepumpe geht in Betrieb, sofern die eingestellte Soll-Vorlauftemperatur einen unteren Grenzwert unterschreitet. Beispielsweise: 1 Kelvin unterhalb der aktuell berechneten Soll-Vorlauftemperatur. Dabei wird der Pufferspeicher Heizung über den Vorlauf der Wärmepumpe geladen. Sofern die untere Pufferspeichertemperatur einen Grenzwert überschreitet, wird die Wärmepumpe deaktiviert. Beispielsweise: Soll-Vorlauftemperatur + 4 Kelvin

### **Zuschaltung Gaskessel im Heizbetrieb**

Das Gaskesselsystem wird für die Heizungsunterstützung freigegeben, wenn einer der folgenden Zustände eintritt:

- Die Austrittstemperatur aus dem Wärmepumpenverdampfer unterschreitet -3°C
- Die Soll-Vorlauftemperatur wird um mehr als 2 Kelvin unterschritten

Dabei beginnt der Gaskessel-Betrieb im untersten Regelbereich der thermischen Leistung. Die Wärmeleistung des Gaskesselsystems wird allmählich hochgefahren, sollte sich der auslösende Zustand nicht nivellieren.

### **Freie Kühlung**

Die Vorlauftemperatur des Kühlkreises ist in Abhängigkeit der Fluidtemperatur aus dem Erdreich bestimmt. Das vorhandene freie Kühlpotential oder auch die Kälte aus eventuell zeitnaher Wärmeerzeugung wird im Pufferspeicher gespeichert und für die Wandkühlung freigegeben, sofern der folgende Zustand auftritt:

- Der 24 h-Mittelwert der Außentemperatur überschreitet einen Grenzwert (Voreinstellung: 12°C).

Falls ein Pufferspeicher für die Kühlung vorliegt: Mit Aktivierung der Solepumpe im Erdsondenkreis und der Ladepumpe Kältepuffer geht die freie Kühlung in Betrieb, sofern die Temperatur unten im Kältepufferspeicher die Soll-Vorlauftemperatur von 16°C überschreitet. Unterschreitet die obere Temperatur des Kältespeichers einen Grenzwert (Voreinstellung: 12°C) wird die freie Kühlung (Solepumpe im Erdsondenkreis / Ladepumpe Kältepuffer) wieder ausgeschaltet.

### **Kühlung als Nebenprodukt der aktiven Heizung - Parallelbetrieb Heizen/Kühlen**

Im Falle einer aktiven Heizung liegt ein Parallelbetrieb Heizen/Kühlen vor, d.h. die Kondensatorabwärme der Wärmepumpe lädt den Pufferspeicher Heizung und die Verdampferseite der Wärmepumpe versorgt den Kältekreis.

Falls ein Pufferspeicher für die Kühlung vorliegt: Mit Aktivierung der Wärmepumpe zum Heizen geht die Ladepumpe Kältepuffer in Betrieb sofern die Temperatur unten im Kältepufferspeicher die Soll-Vorlauftemperatur von 16°C überschreitet. Unterschreitet die obere Temperatur des Kältespeichers einen Grenzwert (Voreinstellung: 10°C), wird die Einspeisung der Kühlung in den Pufferspeicher wieder ausgeschaltet.

**Wichtig:** Zur Unterstützung der thermischen Regeneration des Erdreiches ist die Gebäudekühllast weitestgehend über die freie Kühlung abzuführen. Der unter diesen Umständen erfolgende thermische Wärmeeintrag ins Erdreich kompensiert zum Teil den Wärmeaustrag aus dem Erdreich während der Heizperiode.

Folgende Anforderungen werden an das Anlagenschema bzw. an die spätere Energieerzeugung gestellt:

- Einhaltung der Forderungen aus dem EEWärmeG – dies gilt insbesondere hinsichtlich der Forderungen zu den Anlageneffizienzen der Wärmepumpe
- Einhaltung der Forderungen der BaFa zu den Punkten hydraulischer Abgleich, hydraulische Optimierung, Berücksichtigung von Strom- und Wärmemengenzähler, Effizienzen der Umwälzpumpen für die Heizkreise und den Solekreis in EC-Bauweise, Jahresarbeitszahl und COP der Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage
- Auslegung Systemtemperaturen – Heizbetrieb
- 0°C/-3°C (Solekreis = Verdampferkreis)
- 28°C/40°C (Heizkreis = Kondensatorkreis)
- Coefficient of Performance (COP=Leistungszahl) > 4.3
- Verhältnis Heizleistung der Wärmepumpe zu elektrischer Leistung Solepumpe > 100 - dies ist nur durch eine Anlage mit geringen Druckverlusten aller Komponenten wie Wärmetauscher, Erdsondenkreis etc. zu realisieren
- Die Energiesummen für Wärme und Strom ist für die Wärmepumpe wie auch für die Solepumpe getrennt zu summieren und auszugeben
- Der aktuelle COP und die JAZ sind in Klartextanzeige durch die Anlagensteuerung auszugeben
- Alle wesentlichen Vor- und Rücklauftemperaturen wie auch Speichertemperaturen, Heiz- und Kühlkreistemperaturen sind anzuzeigen, aufzuzeichnen und elektronisch verarbeitbar zur Verfügung zu stellen (z.B. EXCEL Export csv, ASCII etc.)
- Die Grädigkeit des Wärmetauschers „freie Kühlung“ liegt bei max. 1 Kelvin. Dies bedeutet, dass bei einer Soletemperatur von 14°C (Primärseite) eine Vorlauftemperatur von 15°C (Sekundärseite) erreicht wird
- Eine Überdimensionierung der Wärmepumpenanlage ist auszuschließen, da dies zu einem Takten und ineffizienten Wärmepumpenbetrieb sowie zu überhöhten Sondenkosten führt
- Ein Kaltwasser-Pufferspeicher verbessert die Regelbarkeit des Kältekreises

#### **4.1.8 Anforderung Mess-, Steuer- und Regelungstechnik**

Die in diesem Kapitel beschriebenen Anforderungen gelten ausschließlich für die konzeptrelevanten Gebäude- und TGA-Komponenten. Die MSR einzelner Anlagen wie zum Beispiel des Gaskesselsystems, der Wärmepumpe, etc. werden innerhalb des Anforderungskataloges nicht behandelt. Das Gewerk MSR bestimmt das Zusammenspiel zwischen Gebäude und wesentlichen Gewerken wie TGA und Fassade. Umgebungs- und Nutzungseinflüsse wie Temperatur, Feuchte, Strahlung, Wind, Nutzungszustand etc. haben dabei starken Einfluss auf die Gesamtfunktionalität des Gebäudes. Deshalb muss auf die Umsetzung der MSR sowie auf die korrekte Erfassung aller Mess- und Störgrößen besonderes Augenmerk gerichtet werden.

Für die Regelung / Steuerung von Gebäudesystemen ist es wichtig, dass eine Optimierung der Einstellungen für Parameter, Soll- und Grenzwerte sowie eine weitestgehende Anpassung der funktionalen Zusammenhänge während der Phase der Inbetriebnahme und im Alltagsbetrieb noch möglich ist. Die Optimierungen müssen - nach entsprechender Einweisung - durch den Betreiber durchzuführen sein. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass alle Messgrößen über zu definierende Intervalle gemittelt, gespeichert und mittels Trendkurven am Leitreechner dargestellt werden können.

Alle nachfolgend verwendeten Größenangaben sind deshalb als Anfangswerte zu verstehen, die während des Betriebes anpassbar und optimierbar sein müssen. Wo notwendig, sind Grenzwerte mit einer Hysterese zu versehen.

#### **MSR-Fernzugriff und Fernwartung**

Um eine Optimierung der Gebäudfunktionen und Systemwartungen zu erleichtern, empfehlen wir eine Möglichkeit des Fernzugriffes über Modem / Internet auf den MSR-Leitreechner. Vom MSR-Planer sind zu folgenden Punkten Empfehlungen auszusprechen:

- Von wo aus sollen welche Einflussnahmen auf die MSR-Einstellungen möglich sein?
- Wo sollen welche Fehlermeldungen auflaufen?

#### **Leitebene**

Die Leitebene ist die zentrale Einheit zur Überwachung und Führung der Technischen Gebäudeausrüstung. Sie ist mit Ein-/Ausgabegeräten ausgestattet, die die Datenerfassung, Zustandskontrolle und die Eingabe der Zeitprogramme ermöglichen. Die Leitebene besteht aus einem PC, einem Bildschirm, einer Tastatur, dem Feldbusinterface

und einem Drucker. Zur Datenübertragung auf eine Datenbank und zur Fernsteuerung wird LAN/WAN benutzt.

### Automationsebene

Die Automationsstationen verarbeiten Regel- und Steuerfunktionen in Form von festprogrammierbaren Microprogrammfunktionen, die durch die Ereignisse in der Haustechnik oder durch Nutzerbefehle aus der Leitebene ausgelöst werden und selbständig ablaufen. Die Automationsebene leitet auch die Messgrößen an die Leitebene zur historischen Speicherung weiter.

### Feldebene

Die Feldelemente erfassen die Regelgrößen aus den zuständigen Sensoren, leiten diese an die Automationsebene weiter und führen die von der Automationsebene vorgegebenen Steuerungsfunktionen aus. Der Feldbus muss eine für das Gebäude und die Summe aller Feldelemente ausreichende Übertragungsrate aufweisen. Zur Verdeutlichung der Schnittstellen zwischen den verschiedenen MSR-Systemen sind die Informationsflüsse in Abbildung 26 schematisch dargestellt. Die Automations- und Feldebene sind auch beim Ausfall der Leitebene (z.B. beim Absturz des Betriebssystems) weiterhin funktionsfähig.

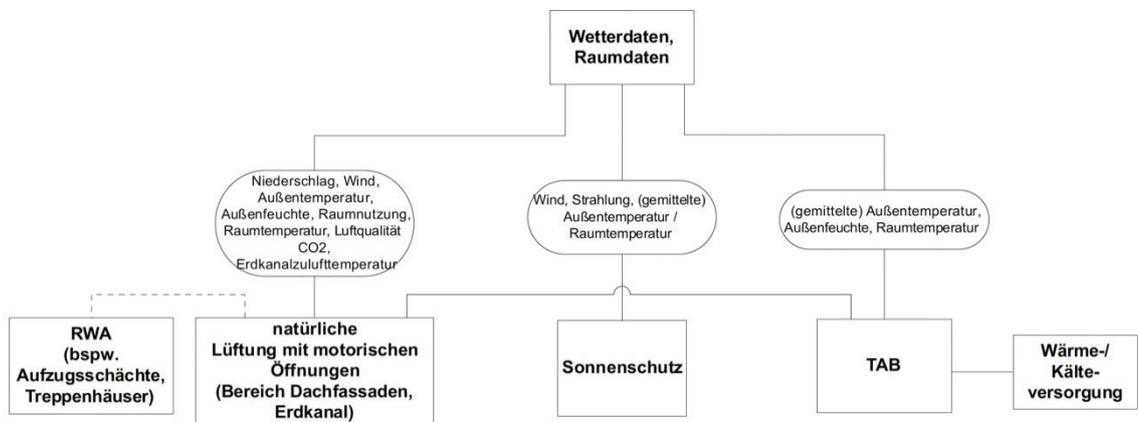


Abbildung 26: Informationsflüsse zwischen MSR-Systemen

### Definition der Prioritätsebenen

Für alle Steuerungen/Regelungen gilt folgende Hierarchie

1. Gefahr für Leib und Leben abwenden - z.B. RWA-Funktionen, Sicherheitsfunktionen

2. Gefahr für wirtschaftlichen Schaden abwenden - z.B. Windwächter zum Schutz des außenliegenden Sonnenschutzes, Niederschlagswächter zum Schließen der Dachöffnungen
3. Übergeordneter manueller Betrieb, Servicefunktion, Wartung
4. individueller manueller Betrieb durch Nutzereingriff
5. Automatikbetrieb

Die in diesem Anforderungskatalog aufgeführten Regelbeschreibungen behandeln vorwiegend die Prioritätsebenen 4 und 5.

### **Inbetriebnahme, Datenerfassung, Betriebsoptimierungen**

- Alle Sensoren sind bei Inbetriebnahme mit einem geeichten Referenzmessgerät-abzugleichen. Die Kalibrierung ist auch softwareseitig durchzuführen – d.h. der Systemwert am Leitrechner muss mit einer Handmessung übereinstimmen. Der Abgleich ist zu protokollieren. Die Messgenauigkeiten schließen die Fehler an den A/D-Wandlern und den Sensorleitungen mit ein.
- Jeder Messeingang muss mit dem Messwert und mit einem frei einstellbaren Simulationswert zur späteren Prüfung der MSR-Funktion belegt werden können.
- Bei den angegebenen Soll-, Grenz- und Parameterwerten handelt es sich um "Startwerte", die zunächst einzustellen und bei der Inbetriebnahme bzw. im Betrieb zu optimieren sind.
- Parameter, Grenz- und Sollwerte werden zentral am Leitrechner verwaltet und nicht auf Feldebene.
- Fehler- / Störmeldungen bei Ausfall wesentlicher Pumpen, Ventilatoren, Sensorik und der Betrieb großer Verbraucher wie beispielsweise der Fassadenheizung laufen zumindest in der MSR-Leitwarte auf; hier anzuzeigen sind zudem Betriebsmeldungen, Leistungs- /Energiedaten wie COP / JAZ, Energiesummen von Wärmeproduktion / Kälteproduktion, Stromverbrauch der Wärmepumpe und Solepumpe; Vor- und Rücklauftemperaturen wie auch Speichertemperaturen, Heiz- und Kühlkreistempertaturen.
- Aufzeichnung, elektronische Verarbeitung in den Formaten z.B. EXCEL Export csv, ASCII etc. und Trendkurven von allen Betriebsmeldungen, Leistungs- / Energiedaten wie COP / JAZ, Energiesummen Wärme / Kälte der Wärmepumpe, der

Solepumpe; Vor- und Rücklauftemperaturen wie auch Speichertemperaturen, Heiz- und Kühlkreistemperaturen.

### **Sensorspezifikation**

Die Auswahl der Fabrikate und die Positionierung der Sensoren ist - sofern diese von den Definitionen H&W / TSE abweichen - mit dem Planungsteam abzustimmen. Dazu sind Datenblätter aller Sensoren mit Messgenauigkeiten und Planauszüge mit Positionierung der Sensoren rechtzeitig dem Planungsteam zur Verfügung zu stellen.

In diesem Kapitel sind die Sensoren für die in diesem Anforderungskatalog aufgeführten MSR-Logikschichten und deren Messgenauigkeiten bei gegebenen Messbereichen spezifiziert. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

**Wichtig:** Die Sensor-Messgenauigkeiten schließen die Fehler an den A/D-Wandlern und an den Sensorleitungen mit ein.

### **Allgemeine Größen**

Unter „allgemeine Größen“ sind die Uhrzeit und die Jahreszeit zu verstehen. Mit diesen Größen sind z. B. Nutzungszeiten festzulegen, die für die Steuerung/Regelung notwendig sind. Vorausgesetzt wird, dass mit Messwerten auch Berechnungen vorgenommen werden können, wie z. B. die zeitliche Mittelwertbildung der Messgröße. Beispiel: Die Außenlufttemperatur muss über ein frei wählbares Zeitintervall als ein laufender Mittelwert abrufbar sein. Diese berechnete Größe wird für den Switch-Over zwischen Heiz- / Kühlmodus benötigt.

### **Temperatursensoren**

Als Messelemente werden Pt-1000- bzw. Pt-100-Sensoren eingesetzt. Dabei sind Pt-100-Sensoren nach dem Vierleiterprinzip zu verdrahten. An die Messgenauigkeit werden folgende Anforderungen gestellt:

- Raumtemperaturen sind mit einer Genauigkeit von mindestens  $\pm 0.25$  Kelvin auf der gesamten Messstrecke zu erfassen; bei der Lufttemperaturmessung ist auf freie Luftdurchströmung des Sensorgehäuses zu achten; elektronische Bauteile sind so anzuordnen, dass die Wärmeentwicklung durch diese Bauteile die Messung nicht verfälscht; es sind Raumpositionen zu wählen, die mit Sicherheit eine direkte solare Exposition des Sensorgehäuses ausschließen; die Raumpositionen sowie das Design des Sensorgehäuses sind mit der Architektur abzustimmen; min. einen Raumtemperaturfühler erhält jede Zone mit Wandheizung

- Medientemperaturen sind mit einer Genauigkeit von mindestens +/- 0.1 Kelvin auf der gesamten Messstrecke zu erfassen
- Temperaturen von Massivbauteilen sind mit einer Genauigkeit von mindestens +/- 0.1 Kelvin auf der gesamten Messstrecke zu erfassen;
- Außentemperaturen sind mit einer Genauigkeit von mindestens +/- 0.25 Kelvin auf der gesamten Messstrecke zu erfassen; der Fühler ist beispielsweise an einem Messmast zu montieren; alternativ kann dieser an einer geeigneten Stelle an der Nordfassade angebracht werden.

**Wichtig:** Der Außentemperatursensor ist mit einem hochwertigen und gut durchlüfteten Strahlungsschutz zu versehen; möglicher Hersteller: Thies „Wetter- und Strahlungsschutz, compact, s.a. [www.thiesclima.com](http://www.thiesclima.com) ; die Positionierung ist mit der Architektur abzustimmen

### **Wetterstation**

Die Wetterstation ist an einer geeigneten Stelle am Gebäude oder in dessen unmittelbarer Nähe zu installieren. Die Positionierung ist mit den Architekten abzustimmen. Bezüglich Wind, Temperatur und Solarstrahlung ist auf möglichst geringe Beeinflussung zu achten. Zur Minimierung der Sensoranzahl wird empfohlen, die Messinformationen der Wetterstation über Gateways allen technischen Komponenten zur Verfügung zu stellen, die solche Informationen benötigen.

### **Solare Bestrahlung auf die Fassaden für die Sonnenschutz- und Kunstlichtsteuerung**

Zur Ermittlung der Einstrahlungen auf die Gebäudehülle werden 5 Beleuchtungsstärke-sensoren mit der Orientierung der 4 Hauptfassaden, sowie für die Horizontale eingesetzt. Die Messgenauigkeit beträgt 200 lx bei einem Messintervall von 0 – 100'000 lx.

### **Niederschlagswächter**

Als Niederschlagswächter ist ein optisch arbeitendes Sensorelement (Lichtschrankenprinzip) mit variabel einstellbarem Schwellenwert einzusetzen. Der Niederschlagssensor ist so zu installieren, dass auch bei stärkerem Wind die Funktion gewährleistet bleibt.

## Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Zur Messung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung ist ein kombinierter Windgeber auf dem Messmast zu installieren. Die Funktion des Sensors muss bis zu Außentemperaturen von  $-20^{\circ}\text{C}$  gewährleistet sein. Der Messbereich liegt bei  $0 \dots 30 \text{ m/s}$  und einer Auflösung von  $\pm 0.5 \text{ m/s}$ ; am Messort sind Turbulenzen und Windschatten bei allen Windrichtungen zu vermeiden.

## Außentemperatursensor und Luftfeuchte

Die Außentemperaturen werden mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.25$  Kelvin im Intervall von  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $50^{\circ}\text{C}$  unter Berücksichtigung der Messstrecke erfasst. Der Sensor ist strahlungsgeschützt zu installieren.

Die Messgenauigkeit des kapazitiven Feuchtefühlers inklusive Messstrecke liegt bei 2 % im Intervall 10 % bis 100 % r. F..

Tabelle 1: Messgrößen Wetterstation

Bezeichnung	Messbereich	Genauigkeit	Pos. Sensor	Anzahl Einheiten	Bemerkung
Außentemperaturfühler	$-25 - 50^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.25 \text{ K}$	z.B. auf Messmast	1	Mit Strahlungsschutz und passiver Durchlüftung
Relative Luftfeuchte der Außentemperatur	10 – 100 % r. F.	$\pm 2 \% \text{ r.F.}$	z.B. auf Messmast	1	Kombifühler mit Außentemperatur möglich
Niederschlagswächter	3 variabel einstellbare Intensitätsstufen	-	z.B. auf Messmast	1	-
Windgeschwindigkeit und Windrichtung	$0 - 30 \text{ m/s}$ $0 - 359^{\circ}$	$\pm 0.5 \text{ m/s}$	z.B. auf Messmast	1	Funktion bis $-20^{\circ}\text{C}$ zu gewährleisten
Beleuchtungsstärke	0 – 100 klux	200 lux	z.B. auf Messmast	Horizontal + 4 Hauptfassaden	-

## Messgrößen Gebäude

Tabelle 2 zeigt die für die Regelung/Steuerung erforderliche Raumsensorik, deren Spezifikationen, sowie Messgenauigkeiten bei gegebenen Messbereichen. Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Installationsorte sind mit der Architektur abzustimmen, auf der folgenden Seite ist ein erster Vorschlag zur Verteilung von funk- oder kabelgebundenen Messelementen. Die Geräte könnten auch mit optischen Signalen ausgestattet werden um den Nutzern eine Information der Raumluftqualität zu geben. Als Beispiel „grün“ bedeutet gute Qualität, „gelb“ bedeutet bitte kurzzeitig lüften.

Zur Erfassung der Energieströme befinden sich in allen wesentlichen Heiz- / Kühlkreisen - für TAB, Lüftung Erdkanal, Brauchwasser - Temperatur- und Massenstromsensoren. Analoges gilt für den Solekreis, um hinsichtlich des Erdreiches den Wärmein- und -output zu monitoren. Der Wärmeoutput von Wärmepumpe wird ebenfalls erfasst. Zudem wird der Stromverbrauch und die Betriebsdauer aller größeren Verbraucher festgehalten wie Aufzug, Wärmepumpe, Solepumpe, Fassadenheizung.

Alle notwendigen Sensoren zur Regelung der Energieerzeugung sowie zur Verteilung von Wärme und Kälte im Gebäude sind vorzusehen. Weiter sind Lufttemperatursensoren am Eintritt der Frischluft in den Erdkanal sowie am Austritt der Zuluft aus dem Heizregister vorzusehen – sofern nicht bereits anlagenseitig vorhanden. Am Zuluftaustritt ist zudem die rel. Zuluftfeuchte zu detektieren.

**Tabelle 2: Messgrößen Innenzonen**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Messbereich</b>	<b>Genauigkeit</b>	<b>Pos. Sensor</b>
Innenraumtemperaturfühler	10 – 40 °C	± 0.25 K	Abstimmung mit Architektur
Feuchtefühler	10 – 100 % r. F.	± 2 % r.F.	Abstimmung mit Architektur
CO <sub>2</sub> -Sensor	0 – 3000 ppm	± 100 ppm	Abstimmung mit Architektur

# Mess-, Steuer- und Regelungstechnik



Abbildung 27: Regelbereiche und Sensor-Positionierung

## 4.2 Methode der Lebenszyklusanalyse

Dieses Kapitel ist ein Auszug aus [1].

Wie wirkt sich ein Bauwerk auf die Umwelt aus? Diese Frage drängt sich immer mehr in den Vordergrund, denn der Bausektor spielt eine wesentliche Rolle in Bezug auf Ressourcenverbrauch, Kreislaufwirtschaft und CO<sub>2</sub>-Bilanz. Die Antwort auf die simple Eingangsfrage fällt dabei jedoch nie einfach aus, denn es gibt sehr viele Aspekte, die sich auf die Umweltwirkung eines Bauprojekts auswirken und die zudem noch voneinander abhängig sind. Entsprechend komplex fällt deshalb die Berechnung der Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse aus.

Der Bausektor ist für einen großen Teil unseres Ressourcenverbrauchs und unserer Treibhausgasemissionen verantwortlich. Der Gebäudebereich verursacht in etwa 40 Prozent unseres Gesamtenergieverbrauchs, 36 Prozent unserer Treibhausgasemissionen, 40 Prozent unseres Materialverbrauchs und rund 33 Prozent aller Abfälle.<sup>1</sup> Die Berücksichtigung von Umweltaspekten bei der Planung von Gebäuden rückt daher immer mehr in den Vordergrund. Die bisher praktizierte Strategie der Verschärfung der Energieeinsparverordnungen in Deutschland kommt bei Energiebedarfswerten von 30 oder 15 kWh/m<sup>2</sup>a an eine Grenze. Zugleich wird deutlich, dass Effizienzsteigerungen in der Gebäudenutzung alleine nicht ausreichen werden, um die in den Klimaschutzvereinbarungen vereinbarten Reduktionsziele zu erreichen. Deshalb kommt der Wahl der Baumaterialien eine wichtige Rolle zu.

### **Die Baustoffe**

In der Diskussion über die „richtige“ Energie, die sich in Deutschland aus der Anti-Atomkraft-Bewegung entwickelte, ergab sich schnell die Unterscheidung in nicht erneuerbare und erneuerbare Energie. Im Baubereich konnte sich diese Erkenntnis allerdings bis heute nicht durchsetzen. Hier ist das Stoffverständnis weiterhin von den naturwissenschaftlichen Denkstrukturen des 19. Jahrhunderts geprägt, die Einteilung orientiert sich an der Gliederung der Chemie in anorganische und organische Stoffe. Ob die Quelle des Kohlenstoffs eine nachwachsende oder eine endliche Ressource ist, bleibt dabei unberücksichtigt. Eine alternative Einteilung, die die Stoffherkunft berücksichtigt, ist die in mineralische, vegetabile/pflanzliche, animalische und synthetische Baustoffe, wobei die pflanzlichen Stoffe erneuerbaren und die synthetischen, nicht erneuerbaren Kohlenstoff enthalten. Die synthetischen Materialien nehmen dabei eine Zwitterstellung zwischen mineralischen und vegetabilen Stoffen ein, weil ihre Ausgangsstoffe zwar ur-

sprünglich pflanzlicher Herkunft sind, sie über Jahrmillionen aber tiefgreifende Veränderungen erfahren haben und zu Kohle, Erdgas oder Erdöl umgewandelt wurden (siehe Abbildung 28).

Die Herkunft der synthetischen Materialien zeigt sich in der zwiespältigen Grundcharakteristik. Sie sind einerseits leicht entflammbar (Kohlenstoff), andererseits nahezu unverrottbar (zusätzliche Komponenten). Mit der Bedeutung der Knappheit der Ressourcen, erstmals aussagekräftig formuliert durch die vom Club of Rome in Auftrag gegebene Studie „Die Grenzen des Wachstums“ (engl. Originaltitel: „The Limits to Growth“<sup>3</sup>), veröffentlicht 1972, bekommt diese Stoffgliederung eine weitreichende Bedeutung, weil die fossilen organischen Rohstoffe auf unserem Planeten endlicher Natur sind.

### **Fossile und nachwachsende Rohstoffe**

Am Beispiel der organischen Baustoffe sollen die spezifischen Stoffeigenschaften und fundamentalen Unterschiede von nicht erneuerbarem und erneuerbarem Kohlenstoff unter ökologischen Gesichtspunkten erläutert werden.

### **Der petrochemische Kohlenstoffkreislauf**

Kunststoffe erobern seit über 100 Jahren immer mehr Lebensbereiche, weil sie in eng fokussierten Nutzungsspektren eindeutige Vorteile gegenüber anderen Materialgruppen aufweisen. Unterschiedliche Mischungsformulierungen verleihen dem Material extrem unterschiedliche Eigenschaften, die zum Beispiel von sehr geringem bis zu sehr hohem Gewicht, von resistent gegen Fäulnis bis zu verrottungsfähig, von hart bis weich und von hochelastisch bis zu reißfähig reichen können. Der in Jahrmillionen entstandene und abgelagerte Kohlenstoff wird durch die Nutzung der fossilen Rohstoffe heute freigesetzt, was durch die Anreicherung in der Atmosphäre zum Phänomen des Treibhauseffekts führt.

Mineralische Baustoffe	Synthetische Baustoffe Nicht erneuerbarer Kohlenstoff	Pflanzliche Baustoffe Erneuerbarer Kohlenstoff	Animalische Baustoffe
---------------------------	--	---	--------------------------

**Abbildung 28: Ökologische Baustoffeinteilung; Quelle: [1, p. 37]**

Im Film „Plastic Planet“<sup>4</sup> von Werner Boote, erschienen 2009, wird auf die Lebenszykluskette von Produkten mit fossilem Rohstoffprofil mit vielen Risikofaktoren hingewiesen. Auffallend ist dabei immer die extreme Dauerhaftigkeit der künstlich gebildeten Stoffe,

die den Abbau und die Wiedereingliederung in das Ökosystem erschwert. Die Haltbarkeit entsteht in vielen Fällen durch toxische Einzelsubstanzen (Weichmacher, UV-Stabilisatoren etc.), die bei ihrer irgendwann erfolgenden Freisetzung das Ökosystem (Erde, Wasser, Luft) und das Biosystem (Plankton, Fisch, Mensch) vergiften.

### Der pflanzliche Kohlenstoffkreislauf

Pflanzen verwandeln durch Photosynthese das Kohlendioxid aus der Luft mit Hilfe der Energie des Sonnenlichts in Saccharide (Abbildung 29). Diese Grundsubstanz wird unter anderem in Zellulose umgebaut, eine Aufbausubstanz für die Faser- beziehungsweise Holzbildung. Dabei wird der für den Menschen lebensnotwendige Sauerstoff freigesetzt.

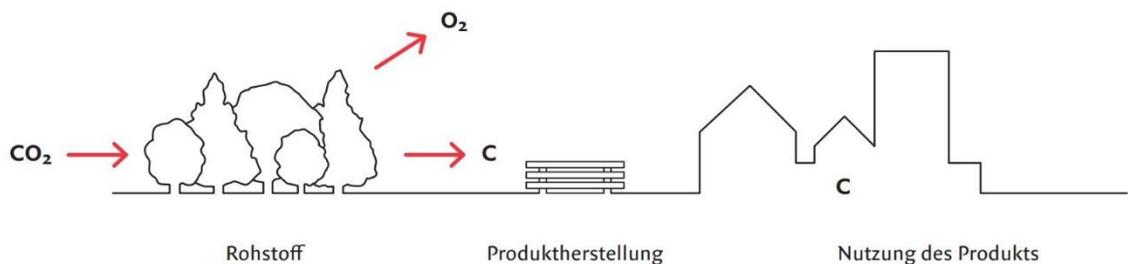


Abbildung 29: Kohlenstoff und Photosynthese von CO<sub>2</sub> zu C; Quelle: [1, p. 38]

Da der Kohlenstoff im Holz beziehungsweise in den daraus hergestellten Bauprodukten gebunden ist, wird ein Gebäude aus Holzprodukten auch Kohlenstoffspeicher genannt. Nach Ende der Nutzungsphase kann das Bauprodukt weiter- oder wiederverwendet werden. Bei Nichtverwendung kann das Material problemlos verbrannt (thermisches Recycling) und die dabei entstehende Wärme genutzt werden (Abbildung 30).



Abbildung 30: Vom Baum zum Baustoff und zum Ende der Nutzung; Quelle: [1, p. 39]

Die geringe Umweltbelastung von nachwachsenden Rohstoffen drückt sich im geringen Primärenergieaufwand beziehungsweise im geringen Output an Klimagasen bei der Her-

stellung aus. Je stärker allerdings der Eingriff in die Ausgangssubstanz Holz mittels Maschinen ausfällt und je mehr Hilfsstoffe wie synthetischer Kleber hinzugefügt werden, desto schneller wird dieser Vorteil aufgezehrt. Die Kohlendioxidakkumulation in der Herstellungsphase, ausgewiesen in Form der Kohlendioxidgutschrift, neutralisiert sich in der Entsorgungsphase des Bauprodukts

## **Ökobilanz**

Lebenszyklusanalysen (LCA) oder Ökobilanzen sind eine etablierte Methode zur Quantifizierung der Umweltwirkung eines Produkts. Sie erlauben es, Umwelteffekte zwischen verschiedenen Produkten zu vergleichen. Für den Gebäudebereich bieten sie die Möglichkeit, Umweltparameter von Gebäuden unterschiedlicher Konstruktionsart zu vergleichen. Auf diese Weise erzeugte Informationen sind der Schlüssel dazu, die positiven Klimaeffekte von verschiedenen Bauprodukten wie Lehmbaustoffen oder Holz- und Holzwerkstoffen aufzuzeigen und in den Kontext der Entscheidungsfindung zu integrieren.

Die Ökobilanz von Gebäuden besteht aus zwei Teilen, einer Stoffstrom- und Energiebilanz mit dem Nachweis des Ressourcenbedarfs und der Primärenergie (nicht erneuerbar und erneuerbar) sowie einer Wirkungsabschätzung mit verschiedenen Indikatoren wie Treibhauspotenzial, Ozonschichtabbaupotenzial, Sommersmogpotenzial, Versauerungs- und Überdüngungspotenzial. Basierend auf der Ermittlung von Bauproduktmengen können die Anteile an nachwachsenden Rohstoffen ermittelt und daraus die Einlagerung der Kohlenstoffmengen und somit der temporäre CO<sub>2</sub>-Speicher berechnet werden. Durch die Verknüpfung der eingesetzten Massen mit Ökobilanzdatensätzen können Wirkungsabschätzungen vorgenommen werden. Aus dem Treibhauspotenzial erschließt sich dann der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Für die Berechnung und Vergleichbarkeit von Ökobilanzen für Gebäude im gesamten Lebenszyklus sind

- die Systemgrenzen – was wird berechnet –,
- das funktionelle Äquivalent – welche Qualitäten besitzt
- der berechnete Gegenstand –,
- die Datenquellen der hinterlegten Bauprodukte

die entscheidenden Eckpunkte einer Lebenszyklusanalyse.

Grundlage für eine Berechnung von Ökobilanzen für Gebäude ist in Europa einheitlich die DIN EN 15978 und auf Produktebene die DIN EN 15804. Hierdurch sind klare Regeln

vorhanden, mit denen die Besonderheiten jedes Gebäudes hinreichend genau dargestellt werden können. Für den eher selten gebrauchten Baustoff Lehm sind ebenfalls aktuelle Ökobilanzdatensätze vorhanden.

Die in diesem Buch beschriebenen Gebäude wurden einer Lebenszyklusanalyse unterzogen. Mittels der Ökobilanz kann der Nachweis erbracht werden, dass sich niedriger Betriebsaufwand und hoher Nutzerkomfort mit geringem Ressourceneinsatz für das Gebäude und geringen Treibhausgasemissionen verbinden lassen.

## Lebenszyklusphasen

Die Betrachtung des Lebenszyklus von Gebäuden erfolgt mit der Zielsetzung, die verwendeten Bauprodukte von der Herstellung bis zur Beseitigung zu berücksichtigen. „Von der Wiege bis zum Grabe“ nennt die DIN EN 15804 dieses Prinzip. Für die Gebäudebewertung bildet die Norm EN 15978 „Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden“ die Basis, für die Ebene der Bauprodukte ist es die EN 15804. Die umweltbezogenen Informationen über den Lebenszyklus eines Gebäudes sind modular aufgebaut. Die roten Bereiche in Abbildung 31 bezeichnen diejenigen Module, die im Rahmen des Projekts bilanziert werden.

Angaben zum Lebenszyklus des Gebäudes				Ergänzende Informationen außerhalb des Lebenszyklus des Gebäudes
A 1–3 Herstellungsphase	A 4–5 (Szenario) Erstellungsphase	B 1–7 (Szenario) Nutzungsphase	C 1–4 (Szenario) Entsorgungsphase	D Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen
A1 A2 A3 Rohstoffbereitstellung Transport Herstellung	A4 A5 Transport Bau/Einbau	B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 Nutzung Instandhaltung Reparatur Ersatz Umbau/Erneuerung Betrieblicher Energieeinsatz Betrieblicher Wassereinsatz	C1 C2 C3 C4 Abbruch Transport Abfallbewirtschaftung Entsorgung	Wiederverwendungs- Rückgewinnungs- Recycling- Potenzial

**Abbildung 31: Modulare Struktur der umweltbezogenen Informationen nach EN 15978; Quelle: [1, p. 40]**

Die Berechnungen orientieren sich methodisch an den Ökobilanzen im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung für Gebäude nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). In der Gebäudeberechnung werden innerhalb der Systemgrenze die Module A1 – A3 (Herstellung), Modul B2 (Instandhaltung) und B4 (Austausch, Ersatz) und die Module C3 – C4 (Entsorgung) berücksichtigt. Für die Bewertung der Gebäude nach den Zertifizierungsregeln der Deutschen Gesellschaft Nachhaltiges Bauen (DGNB) wird zusätzlich das Modul D (Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze) einbezogen. Für die Betriebsphase wird die Phase B6 entsprechend des Endenergiebedarfs ausgewertet.

## **Betrachtungszeitraum**

Der Betrachtungszeitraum orientiert sich an den Regeln der deutschen Nachhaltigkeitsysteme BNB und DGNB. Für die Nutzungskategorie Verwaltungsgebäude werden 50 Jahre festgesetzt, für Produktions- und Lagergebäude verkürzt 20 Jahre. Eine Verlängerung oder Verkürzung des Betrachtungszeitraums hat großen Einfluss auf den Energiebedarf (B6).

## **Endenergiebedarf**

Der Endenergiebedarf der Gebäude wurde nach der im Baujahr gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) berechnet. Für die Gebäude aus der Schweiz (Ricola), England (Vitsoe) und Österreich (Gugler) lag eine Berechnung nach den deutschen Regeln nicht vor. Für diese Gebäude wurde nachträglich eine EnEV-Berechnung durchgeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für diese Gebäude das Referenzklima in Deutschland (Potsdam) angenommen wurde, was mit den anderen nationalen Klimaverhältnissen wahrscheinlich nicht übereinstimmt.

Die Regeln der EnEV können besondere haustechnische Lösungen – wie sie z. B. mit den großen, erdverlegten Lüftungswärmetauschern zum Einsatz kommen – nicht abbilden. Deshalb ist davon auszugehen, dass der berechnete Endenergiebedarf nicht dem tatsächlichen Bedarf der Gebäude entspricht. Die Berechnung kann als ein Worst-Case-Szenario eingestuft werden, denn für derartige Gebäude ist eine energetische Simulationsberechnung auf jeden Fall vorteilhafter. Sie ist zudem realistischer in Bezug auf den prognostizierten Energiebedarf.

Wird Energie am Gebäude mittels einer Photovoltaikanlage erzeugt, dann wird einerseits der gesamte bauliche Aufwand dem Gebäude hinzugerechnet und andererseits die erzeugte Energiemenge dem Gebäude gutgeschrieben.

## **Berechnung und Bewertung**

Die folgenden Projektauswertungen gliedern sich in vier Betrachtungsebenen:

- Materialbilanz
- Primärenergieaufwand
- Klimagas- und Versauerungspotenzial
- DGNB-Einstufung

Alle Berechnungen wurden mit der integralen Berechnungssoftware LEGEP ausgeführt.

## **Materialbilanz**

Die Materialbilanz listet alle der Ökobilanz zugrundeliegenden Materialien auf. Der Umfang und die Genauigkeit hängen von der Präzision und Tiefe der Gebäudeerfassung ab. Das bei Bauobjekten angegebene „Materialkonzept“ umfasst vor allem die Angaben zur Primärkonstruktion wie Ziegel oder Stahlbeton und die sichtbaren, das Gebäude optisch gestaltenden Komponenten von Fassade oder Boden-, Wand- und Deckenoberflächen. Die Materialbilanz dagegen umfasst alle verwendeten Baustoffe nach ihren Quantitäten. Dies betrifft auch die nicht sichtbaren Materialien, beispielsweise die in den Betonbauteilen eingelagerte Stahlbewehrung oder die Fundamente. Wer kennt schon die Betonwiderlager in der Größe von Einfamilienhäusern, die das freigespannte Olympiadach in München im Erdreich verankern?

## **Primärenergieaufwand**

Der Primärenergieaufwand entspricht weitgehend dem kumulierten Energieaufwand (KEA), verwendet wird häufig auch der Begriff graue Energie. Der Primärenergieaufwand bezeichnet in Ökobilanzen diejenige Energie, die aus dem Nutzenergieaufwand für die Baustoffproduktion auf die dafür notwendige Menge an Primärenergieträgern zurückgerechnet wird.

Primärenergieträger sind Erdöl, Erdgas, Kohle, Wasserkraft, Windkraft und Uran. Unterschieden wird in erneuerbare Primärenergie aus regenerativen Quellen (Wind, Wasser, nachwachsende Rohstoffe) und nicht erneuerbare Primärenergie aus nicht regenerativen Quellen, die meist fossilen Ursprungs sind (Erdöl, Erdgas, Kohle, Uran).

Entsprechend der DIN EN 15804 wird des Weiteren unterschieden zwischen Primärenergie erneuerbar (PER) und nicht erneuerbar (PENR) sowie zwischen Primärenergie zur stofflichen (PERM/PENRM) und energetischen Nutzung (PERE/PENRE). Die gleiche Unterscheidung findet sich auch bei der Primärenergie gesamt (PETM und PETE).

## **Wirkungsbilanz**

Das Klimagaspotenzial zeigt die Wirkung auf, die der oben beschriebene Primärenergieaufwand auf das Klima hat. Bei dieser ökologischen Bewertungsmethode werden alle treibhausrelevanten Emissionen gemäß ihrer Wirkung summiert. Klimarelevante Gase sind Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) oder Lachgas (N<sub>2</sub>O). Dabei wird die unterschiedlich starke Wirkung auf den Treibhauseffekt berücksichtigt und die Summe als CO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben. Die englische Bezeichnung für das Klimagaspotenzial lautet Global Warming Potential (GWP).

Die Wirkungskategorie „Treibhausgaspotenzial“ wird häufig auch als ökologischer Fußabdruck bzw. Carbon Footprint bezeichnet und beschreibt den anthropogenen Anteil an der Erderwärmung des Klimas. Es wird ebenfalls als CO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben. Um die Verweildauer der Klimagase in der Atmosphäre mitzuberücksichtigen, wird immer eine Integrationszeit mit angegeben, meist GWP 100 für 100 Jahre. Der Indikator Treibhausgas selbst ist nicht geeignet, um eine Aussage über die Menge des gespeicherten Kohlenstoffs C durch nachwachsende Baustoffe im Gebäude während der Nutzungsphase zu treffen, weil der CO<sub>2</sub>-Speicher am Ende des Lebenszyklus thermisch verwertet wird und damit verloren geht. Deshalb wird in Zukunft der eingespeicherte Kohlenstoff, engl. „Stored Carbon“, zusätzlich zu den anderen Ökobilanzindikatoren angegeben werden.

Das Versauerungspotenzial bezeichnet die Summe der Wirkung aller versauernd wirkenden Substanzen. Diese werden in der Summe als Schwefeldioxidäquivalent (SO<sub>2</sub>) angegeben.

### **Die DGNB-Einstufung**

Zur Bewertung der Berechnungsergebnisse der verschiedenen Objekte kann das deutsche Bewertungssystem für die Nachhaltigkeit von Gebäuden der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) herangezogen werden. Dabei wird auf Basis der erreichten Punktzahl bei den relevanten Steckbriefen der Ökobilanz eine mögliche Tendenz bezüglich des Abschneidens des Gebäudes im Gesamtsystem angegeben.

Wie im Kapitel Endenergiebedarf bereits angedeutet wurde, beruhen die Angaben des Endenergiebedarfs auf den Berechnungen der EnEV. Eine Simulationsberechnung weist jedoch vorteilhaftere Werte für diese Gebäude aus. Deshalb sind die Angaben zu den erreichten Werten als Worst-Case-Szenario zu interpretieren. Seit dem Systemwechsel der DGNB-Zertifizierung 2018 sind Simulationsberechnungen zulässig.

#### **4.2.1 Begriffsdefinition Ressourcenneutralität**

Hauptbestandteil des vorliegenden Forschungsprojektes ist die Bewertung der Ressourcenneutralität der Alnatura-Arbeitswelt. Der Begriff „Ressourcenneutralität“ impliziert eine Bilanzierung der Ressourcen. Die Begriffe „Ressource“ und „Rohstoff“ werden im allgemeinen Sprachgebrauch häufig als Synonyme verwendet. Im Vergleich zum Rohstoff schließt der Begriff Ressource auch Nichtstoffliches mit ein: Laut Duden ist eine Ressource ein „natürlich vorhandener Bestand von etwas, was für einen bestimmten Zweck, besonders zur Ernährung der Menschen und zur wirtschaftlichen Produktion, [ständig] benötigt wird“ [5]. Ein Rohstoff ist ein, „für eine industrielle Be-, Verarbeitung

geeigneter oder bestimmter Stoff, den die Natur liefert“ [5]. Wie am Beispiel dieser beiden Definitionen deutlich wird, sind die Begriffe nicht präzise definiert und abhängig vom Bezugssystem „Natur“. Darüber hinaus gibt es für „die Natur“ keine einheitliche Definition. Selbst innerhalb einer Quelle werden häufig mehrere Definitionen angegeben und diskutiert. Der Duden, zum Beispiel, gibt sechs verschiedene Definitionen an. Hauptunterschied der verschiedenen vorliegenden Definitionen ist, ob der Mensch (und damit auch menschlich Erschaffenes) ein Teil der Natur ist oder nicht. Folglich ist eine projektspezifische Definition für das Bezugssystem „Natur“, eine klare Definition des zeitlichen und räumlichen Bilanzraumes und ein einheitliches Verständnis für die Begriffe „Ressource“ und „Rohstoffe“ grundlegend für die Bewertung der angestrebten „Ressourcenneutralität“.

Zur Herleitung der Definitionen wird zunächst das End-Of-Life-Szenario des Gebäudes und damit die verschiedenen Möglichkeiten zur Wieder-, und Weiterverwendung sowie zur Entsorgung der Bauteile bzw. Baustoffe mit beleuchtet. Grundsätzlich gibt es am Ende der Lebenszeit vier verschiedene Verwendungsmöglichkeiten für den Baustoff:

- die direkte stoffliche Wiederverwendung des Primärbaustoffes (z.B.: Wiederverwendung von Faserzementplatten bei zerstörungsfreier Demontage)
- die stoffliche Wiederverwendung des Sekundärbaustoffs (z.B.: als Schüttmaterial für den Straßenbau)
- die thermische Weiterverwendung (Verbrennung von organischen Baustoffen in Müllverbrennungsanlagen)
- die Endlagerung auf einer Deponie (z.B.: Altbeton, Bauschutt)

Bei der stofflichen Wiederverwendung des Primär- oder Sekundärstoffes werden die verwendeten Ressourcen zum Teil oder vollständig unter Energieverbrauch wiederverwendet. Bei der thermischen Verbrennung wird der ursprüngliche Rohstoff zerstört, während die Ressource „Energie“ frei wird. Daraus ergibt sich eine Herausforderung für die Evaluierbarkeit des Projektes, da stoffliche und energetische Ressourcen nicht direkt miteinander verglichen werden können. Die folgenden zwei Beispiele sollen diese Problematik verdeutlichen:

### Beispiel 1:

Erdöl kann sowohl als stoffliche als auch als energetische Ressource genutzt werden. Aus Erdöl kann zum Beispiel eine Kunststoffolie hergestellt werden, die primär als Dampfsperre eines Daches dient und am Ende der Lebensdauer thermisch genutzt wird. Bei der reinen thermischen Nutzung wird Energie frei, es entstehen aber auch Emissionen und der Rohstoff Erdöl wird aus dem System entfernt. Nun stellt sich die Frage, wie kann berücksichtigt werden, dass eine Ressource zunächst stofflich und anschließend energetisch genutzt wird? Wie lässt sich dieser Zusammenhang bewerten?

### Beispiel 2:

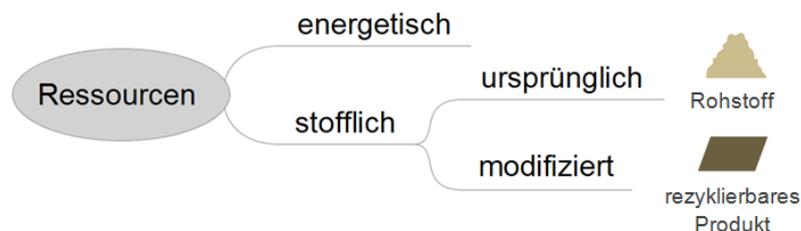
Schiefer, der ursprünglich als Tonstein bzw. Stillstein vorliegt, muss nur geringfügig bearbeitet werden, bis er als Dachschindel genutzt werden kann. Schieferdachschindeln haben in der Regel eine deutlich höhere Lebensdauer (>100 Jahre, z.B. Burg Eltz 300 Jahre [6]) als das entsprechende Gebäude (Annahme 60 Jahre). Deswegen können Schieferschindeln mit wenig energetischem Aufwand häufig rezykliert werden. Schieferschindeln können zwar nicht thermisch genutzt werden, liegen jedoch am Ende ihrer Lebensdauer in einer nahezu ursprünglichen Form vor und haben keine Auswirkungen auf die Umwelt.

Neben der Schwierigkeit einen einheitlichen Vergleichswert zu definieren, ist zum Zeitpunkt der Planung nicht bekannt, wie die Baustoffe am Ende der Lebensdauer wieder- bzw. weiterverwendet werden und welche weiteren Möglichkeiten bis dahin entwickelt bzw. entdeckt werden. Das heißt, es liegen keine genauen Daten für die End-Of-Life-Phase vor. Es ist lediglich möglich, Annahmen mit großen Unsicherheiten zum End-Of-Life-Szenario zu treffen.

Totale Ressourcenneutralität wird erreicht, wenn vor und nach dem Bau des Gebäudes die gleiche Anzahl an Ressourcen in unveränderter Form im Bezugssystem („Natur“) vorliegt. Besser verständlich wird dieser Zusammenhang durch den Begriff des „Rohstofflagers“, der im Nachhaltigkeitskonzept von Alnatura verwendet wurde („Das Gebäude dient als Rohstofflager“ [7]).

Daraus resultiert, dass zur praxisnahen Bewertung der Ressourcenneutralität während des Planungsprozesses eine Methodik entwickelt wird, die die Aspekte der End-Of-Life-Phase mit einbezieht ohne jedoch genaue Zahlenwerte zu fordern. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass Ressourcen gleicher Einheit bilanziert werden (vergleiche Beispiel 1). Im Rahmen dieses Projektes wurde, deswegen die „Max-Reuse-Methodik“ aus „Alnatura I“ durch folgende Betrachtungsweise weiterentwickelt: [4]

Ressourcen werden in energetische und stoffliche Ressourcen unterteilt. Stoffliche Ressourcen werden weiter in Rohstoffe und rezyklierbare Produkte unterschieden. Rohstoffe liegen in ihrer ursprünglichen Form vor, d.h. sie sind nicht vom Menschen modifiziert worden. Dahingegen ist ein rezyklierbares Produkt bereits vom Menschen modifiziert worden. Daraus ergibt sich für das Bezugssystem „Natur“ eine gesamtheitliche Definition, die den Menschen mit einbezieht.



**Abbildung 32: Begriffliche Unterscheidung von energetischen und stofflichen Ressourcen**

Abbildung 32 visualisiert die begrifflichen Unterscheidungen. Am Beispiel eines Zinkstehfalzdaches kann die stoffliche Ressource ein Zinkblech sein, das bereits im Bezugssystem vorliegt und rezykliert werden kann (rezyklierbares Produkt) oder es kann aus dem Rohstoff Zinksulfiderz ein neues Zinkblech hergestellt werden kann.

Um eindeutige Ergebnisse zu erhalten, wird getrennt nach stofflichen und energetischen Ressourcen bilanziert. Dadurch wird vermieden, dass stoffliche Ressourcenreduzierung durch energetische Neutralität versteckt wird.

Die räumlichen Bilanzgrenzen werden durch die Gebäudehülle gebildet. Der zeitliche Bilanzraum ist durch den Zeitpunkt der Planung und den Zeitpunkt des vollständigen Rückbaus definiert.

Die stoffliche Bilanzierungsebene ist in Abbildung 33 in Grün dargestellt. Wird eine stoffliche Ressource, in ihrem vorliegenden Zustand, zum Bau des Gebäudes aus dem Bezugssystem entnommen, muss diese am Ende der Bilanzierung in den gleichen Zustand zurückgeführt werden, um eine Ressourcenneutralität zu erreichen. Am Beispiel des Zinkstehfalzdaches bedeutet dies: Wird ein neues Zinkblech für den Dachbelag verwendet, wird aus der Natur ein Teil des Rohstoffes Zinksulfiderz entwendet. Das heißt um stoffliche Ressourcenneutralität zu erreichen, müssen beim Rückbau das Zinkblech die gleiche Menge Zinksulfiderz zurückgeführt werden. Jedoch ist dies, selbst unter hohem Energieaufwand, praktisch unmöglich. Folglich ist eine stoffliche Ressourcenneutralität auf diese Weise zurzeit nur theoretisch erreichbar. Realistischer Weise wird die Menge

des Zinksulfiderzes im Bezugssystem reduziert. Wird allerdings ein rezyklierbares Zinkblech verwendet, das zum Zeitpunkt des Rückbaus im gleichbleibenden Zustand erneut als stoffliche Ressource dient, ist die stoffliche Ressourcenneutralität gewährleistet (siehe Abbildung 33, Alternative 2).

Bei der energetischen Bilanzierung werden alle Energieströme, die während des gesamten Lebenszyklus anfallen, summiert. Die Bilanz konzentriert sich auf die materialgebundene Energie bzw. graue Energie. Die Betriebsenergie wird nicht mit bilanziert, sondern ausführlich in der Projekt-Phase II analysiert. Visualisiert ist die energetische Bilanzierungsebene in Abbildung 33 und Abbildung 34 in Rot. Kann das Bauteil thermisch verwertet werden und ist die dabei freiwerdende Energie gleich des gesamten Energieaufwandes für Herstellung, Transport, Ein- und Rückbau ist die energetische Ressourcenneutralität erreicht (siehe Abbildung 34).

Wie an diesem Beispiel des Zinkstehfalzdaches deutlich wird, ist es nur bedingt möglich, die stoffliche und energetische Ressourcenneutralität gleichermaßen zu erreichen. Lediglich für nachwachsende Ressourcen, z.B. Holz, ist dies theoretisch möglich: Um die anfallende Energie für die Herstellung, den Transport, den Ein- und Rückbau eines Bauholzes zu kompensieren, ist es notwendig die im Heizwert gespeicherte Energie am Ende des Lebenszyklus durch thermische Verwertung dem Bezugssystem wieder zur Verfügung zu stellen. Durch die Verbrennung wird jedoch die stoffliche Ressource (der Baum) aus dem Bezugssystem entfernt. Die dadurch entstehende Reduktion der stofflichen Ressourcen, kann durch natürliches Wachstum der nachwachsenden Rohstoffe ausgleichen werden, während sie bei nichtnachwachsenden Rohstoffen bestehen bleibt. Unter der Annahme, dass während der Nutzungsphase ein gleichwertiger Baum nachgewachsen ist und der Heizwert des Holzes dem gesamten spezifischen Energieaufwand entspricht, ist stoffliche und energetische Ressourcenneutralität gleichzeitig erreicht (siehe Abbildung 34).

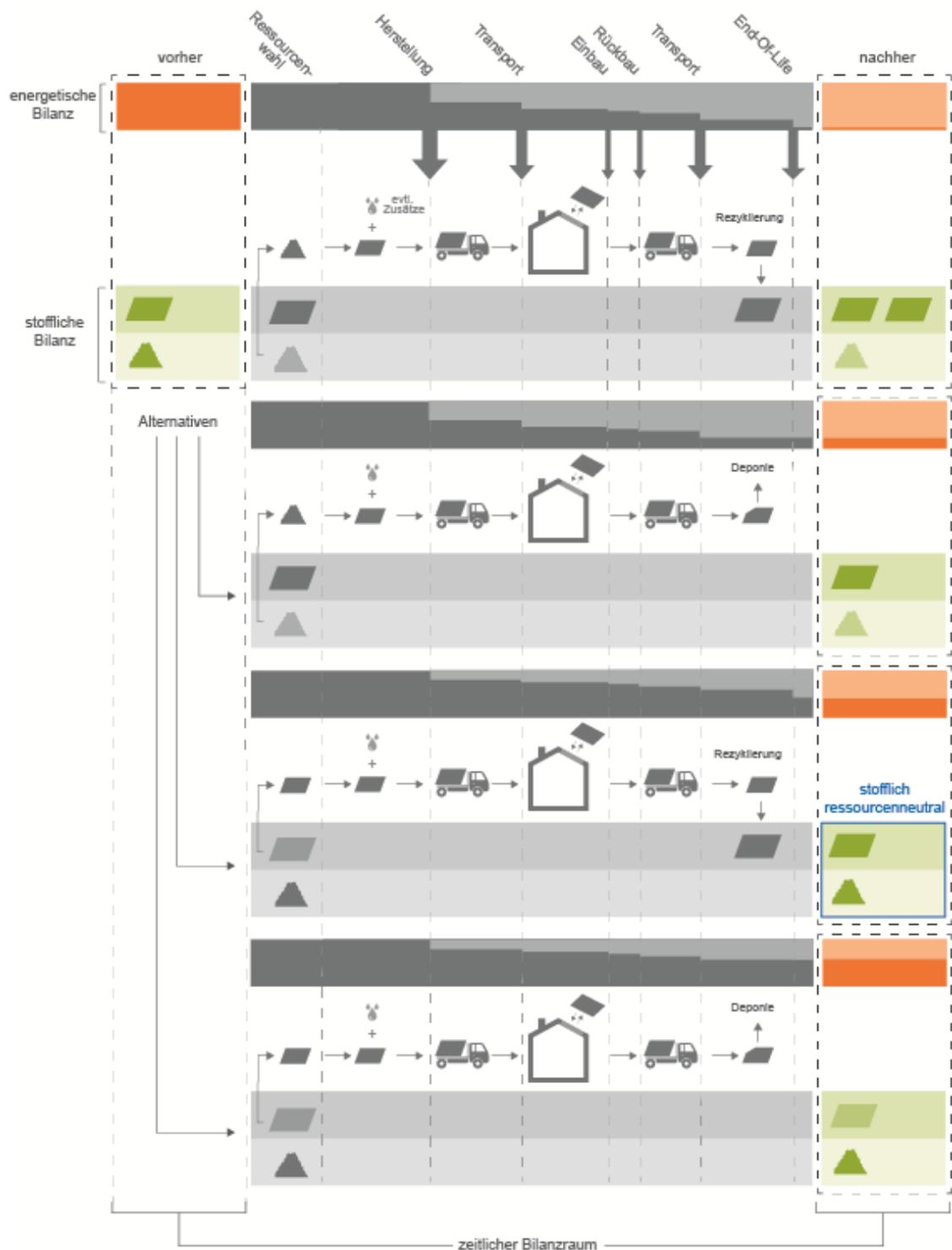
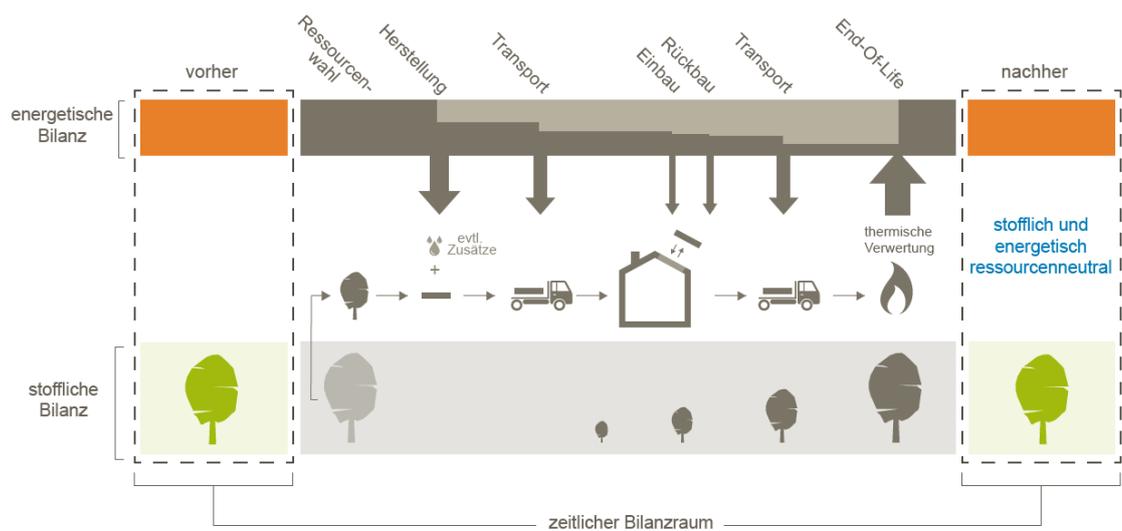


Abbildung 33: Darstellung der stofflichen und der energetischen Bilanzierung für den Fall eines Dachbelages aus Zink

Wird jedoch das Holz behandelt, z.B.: imprägniert, muss das Imprägniermittel theoretisch in der energetischen und stofflichen Bilanz mitberücksichtigt werden. Da während des integrativen Planungsprozesses die Art und die Menge von Zusatzstoffen (z.B.: Imprägniermittel oder Biozide) aufgrund unzureichender Herstellerangaben in der Praxis selten erfassbar sind, wird zum aktuellen Bearbeitungszeitpunkt die Bilanzierung von

Zusatzstoffen vernachlässigt. Dennoch werden anfallende Schadstoffemissionen bei behandelten Materialien während des gesamten Lebenszyklus mitberücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine gleichzeitige energetische und stoffliche Ressourcenneutralität unter Verwendung von nachwachsenden und unbehandelten Materialien erreichbar ist, wenn gewährleistet ist, dass die Rohstoffe bis zum Zeitpunkt der thermischen Verwertung nachgewachsen sind. Darüber hinaus muss der Heizwert der Materialien mindestens der spezifischen Energiemenge für die Herstellung, den Transport und den Ein- und Rückbau des Materials entsprechen. Um jedoch ein reales, robustes, langlebiges und komfortables Gebäude zu errichten, ist es zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich auf nicht nachwachsende Rohstoffe zu verzichten (z.B.: für Glasfenster, Edelstahl-Trinkwasserleitungen, etc.). Deswegen wird im Rahmen dessen für das vorliegende Forschungsprojekt eine „bestmögliche Ressourcenneutralität“, d.h. eine „Ressourcenschonung“, angestrebt. Dazu sollen möglichst ausschließlich rezyklierbare, unbehandelte, sortenrein trennbare und regionale Baumaterialien verwendet werden.



**Abbildung 34: Darstellung der stofflichen und der energetischen Bilanzierung für das Baumaterial Holz. Für nachwachsende Rohstoffe ist die energetische und stoffliche Ressourcenneutralität theoretisch erreichbar**

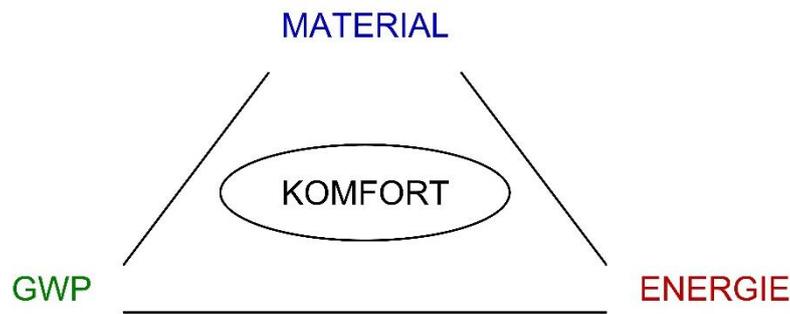


Abbildung 35: Trilogie aus GWP – Material - Energie

#### 4.2.2 Beschreibung Lebenszyklusanalyse und graue Energie

Die DIN EN 15804 definiert Grundregeln zur Bewertung der Nachhaltigkeit im Lebenszyklus von Bauprodukten. Sie teilt den Lebenszyklus eines Gebäudes in fünf Phasen: Die Herstellungsphase (A1-A3), die Errichtungsphase (A4-A5), die Nutzungsphase (B1-B7), die Entsorgungsphase (C1-C4) und in die Recyclingphase D (siehe [4]). Die Datenbank ÖKOBAUDAT, die vom Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (BMI) kostenfrei zur Verfügung gestellt wird, bietet Datensätze zu über 1000 verschiedenen Bauprodukten. EPD basiert auf ISO 14040.

In der DIN EN15804 können die Module A1, A2 und A3 als aggregiertes Modul A1-3 ausgewiesen werden. Bei der Aggregation werden keine weiteren Informationen oder Annahmen, wie zum Beispiel Transportdistanzen, angegeben, sodass aus einem aggregierten Datensatz die einzelnen Module nicht eindeutig abgeleitet werden können. Die meisten Datensätze werden aggregiert angegeben.

Der Begriff „graue Energie“ bezieht sich in diesem Forschungsprojekt auf die gesamte Herstellungs- und Errichtungsphase (A1-A5).

Die Zertifizierung der DGNB berücksichtigt in der Lebenszyklusphase nicht alle Phasen. Für die Zertifizierung müssen die Module A1-A3 angegeben werden, der Transport zur Baustelle A4 und die Errichtung A5 wird nicht berechnet, da diese je nach Gebäude individuell sind und dadurch der Vergleich erschwert wird.

Produktdeklarationen, wie die EPD (Environmental Product Declaration), beinhalten Informationen zu den Umweltwirkungen einzelner Bauprodukte. Der Bilanzraum der EPDs beschränkt sich auf Bauprodukte, sodass keine Informationen zum Bauprozess des Gebäudes, wie zum Beispiel der Transport zur Baustelle A2 und zur Errichtung A5, enthalten sind. Aus diesem Grund liegen derzeit keine ausreichenden Informationen zu den

Modulen des Transportes, A2 und A4, und zur Errichtung vor. In diesem Forschungsvorhaben werden diese Module durch Messungen oder Literaturrecherche erfasst und analysiert.

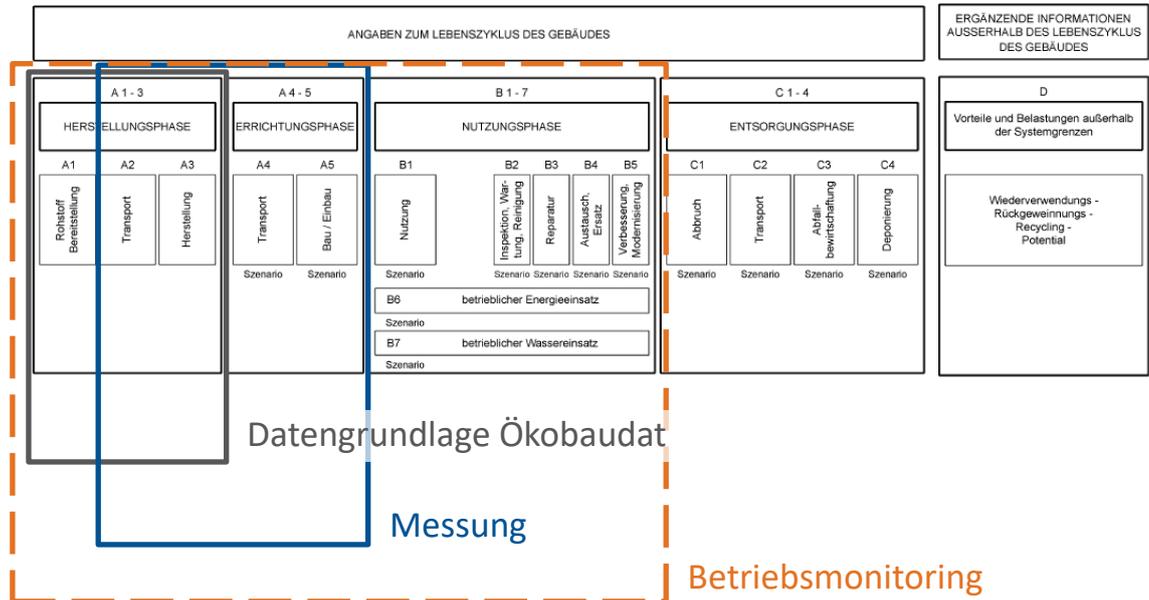


Abbildung 36: Für Stampflehm sind für Phase A1-A3 aggregierte Literaturdaten verfügbar. Phasen A2-A5 durch Messung innerhalb dieser Arbeit. Darstellung basierend auf DIN EN 15804

Der Begriff „graue Energie“ bezieht sich in diesem Forschungsprojekt auf die gesamte Herstellungs- und Errichtungsphase (A1-A5) gemäß DIN EN 15804.

#### 4.2.2.1 Ökobilanz

Auszug aus [1].

Das 2018 gebaute Objekt bietet Platz für die Verwaltung des Naturkostgroßhandels mit ca. 500 Arbeitsplätzen. Das Gebäude besteht aus einem rechteckigen Baukörper mit einem einfachen geneigten Dach. Es umfasst die in Tabelle 3 aufgelisteten Kubaturen und Flächen.

**Tabelle 3: Kubaturen und Flächen**

<b>Indikator</b>	<b>Wert</b>
Bruttorauminhalt	71.276 m <sup>3</sup>
Bruttorauminhalt beheizt	71.276 m <sup>3</sup>
Bruttogrundfläche	13.705 m <sup>2</sup>
Nettoraumfläche	12.146 m <sup>2</sup>
Nettoraumfläche beheizt	12.146 m <sup>2</sup>

Mit 13.705 m<sup>2</sup> Bruttogeschossfläche (BGF) und 12.146 m<sup>2</sup> Nettoraumfläche (NRF) ist das Bauwerk das flächenmäßig größte Objekt in dieser Buchauswahl. Die Konstruktionsfläche umfasst 1.559 m<sup>2</sup> oder 11,4 Prozent der BGF – ein sehr günstiger Wert für ein Verwaltungsgebäude. Dies wird durch die offene Raumkonzeption in Verbindung mit dem großen Atrium erreicht. Die gesamte NRF wird beheizt.

Tabelle 4 listet den Endenergiebedarf für das reale Gebäude und das Referenzgebäude nach EnEV auf. Unterschieden werden dabei die verschiedenen Einsatzzwecke der Energie.

**Tabelle 4: Endenergiebedarf Real vs. Referenz**

<b>Endenergiebedarf in kWh/(m<sup>2</sup>*a)</b>	<b>Reales Gebäude</b>	<b>Referenzgebäude</b>
Beheizung	34,0	66,4
Warmwasser	6,6	5,3
Hilfsenergie	9,2	7,0
Beleuchtung	11,2	14,6
Lüftung	9,1	7,4
Kühlung	0,4	2,7
Summe	70,5	103,4
Eigenstromerzeugung	7,0	0

Im Vergleich der Endenergiewerte erreicht das reale Gebäude nur 70 Prozent des Referenzgebäudes. Das reale Gebäude wird über eine Mischung aus Gasbrennwertkessel und elektrischer Wärmepumpe beheizt. Im Gegensatz zu den Produktionsgebäuden wird das Gebäude umfangreich temperiert. Eine künstliche Kühlung ist nur für die Gastronomie und die Serverräume vorgesehen.

Die Photovoltaikanlage auf dem Dach produziert ca. 90.000 kWh/a und reduziert den Endenergieaufwand um ca. 10 Prozent.

#### **4.2.2.2 Materialbilanz (nur Herstellung)**

Bei der Gebäudekonzeption wurde eine ungewöhnliche Mischkonstruktion verfolgt. Das Untergeschoss, die Innenstützen, die aussteifenden Kerne des Treppenhauses und der Aufzüge und die Decken wurden in Stahlbeton gebaut. Dies ergab sich aus der Notwendigkeit des Brandschutzes für die offene Atriumkonstruktion des gesamten Gebäudes. Die Außenwände an den beiden Traufseiten wurden in selbsttragender, zweischaliger Bauweise aus Stampflehm errichtet. Die beiden Giebelseiten wurden vor den tragenden Holzsäulen der Außenfassadenkonstruktion großflächig verglast. Der größte Teil des eingesetzten Baumetalls entfällt auf den Bewehrungsstahl für die Stahlbetonbauteile.

Das Gesamtgewicht des hergestellten Gebäudes beträgt 22.152 t, bezogen auf die Nettoraumfläche (NRF) beträgt das Verhältnis 1.824 kg/m<sup>2</sup> NRF. Der Lehmanteil am Gesamtkonstruktionsgewicht beträgt 1.318 t bzw. 5,95 Prozent der Gesamtmasse. Die nachwachsenden Rohstoffe haben in der Primär- und Sekundärkonstruktion einen Anteil von 1,5 Prozent oder 332 t bzw. 37 kg/m<sup>2</sup> NRF. Der nachwachsende Rohstoffanteil fällt entgegen der optischen Wahrnehmung der Gebäudeoberflächen gering aus, weil große Teile der Primärkonstruktion aus Stahlbeton bestehen.

Der Kohlenstoffspeicher der nachwachsenden Rohstoffe beträgt 163 t bzw. 13,4 kg/m<sup>2</sup> NRF. Umgerechnet in CO<sub>2</sub>-Werte ergeben sich absolut 597 t.

Die Aufteilung der Baustoffe auf die verschiedenen Materialklassen ergibt:

**Tabelle 5: Aufteilung Baustoffe nach Materialklasse**

<b>Materialklasse</b>	<b>Anteil</b>
Primärkonstruktion mineralisch	80,5 %
Primärkonstruktion nachwachsend	1,4 %
Primärkonstruktion Metall	3,2 %
Sekundärkonstruktion Lehm	5,9 %
Ausbaumaterialien	9,0 %

Die Ökobilanz unterscheidet zwischen dem Stoff- und Energieinput und den Wirkungen für die Umwelt, die dieser Aufwand bedeutet. Das Gebäude wird als Verwaltungsgebäude mit 50 Jahren Betrachtungszeitraum berechnet.

#### **4.2.2.3 Phasenvergleich**

Der prozentuale Vergleich der verschiedenen Gebäudephasen zeigt bei diesem Verwaltungsgebäude den Einfluss des 50-jährigen Betrachtungszeitraums. Die Instandsetzungsphase (B2, B4 dunkelgrau) des Gebäudes tritt deutlich neben die Herstellungsphase. Die Entsorgungsphase (C3 – C4 lachsrot) des Gebäudes hat nur noch einen geringen Anteil an den Umwelteinträgen. Die Betriebsphase (B6 weiß, schwarz umrandet) erreicht nur bei allen Indikatoren einen Anteil von über 50 bis 80 Prozent. Die Betriebsbilanz wird durch die Stromeigenerzeugung verbessert.

#### **DGNB-Einstufung**

Die Einstufung nach dem DGNB-Zertifizierungssystem für die DGNB-Kategorie Büro- und Verwaltungsbau (NBV-Typ 1 2018) ergibt einen Erfüllungsgrad von 87,3 Prozent und damit eine Tendenz zu einer Platin-Auszeichnung.

	 PLATIN	 GOLD	 SILBER	 BRONZE*
Gesamterfüllungsgrad	ab 80%	ab 65%	ab 50%	ab 35%
Mindesterfüllungsgrad	65%	50%	35%	— %

Abbildung 37: DGNB-Auszeichnungslogik; Quelle: <https://www.dgnb-system.de/de/zertifizierung/bewertung/index.php>

#### 4.2.3 Evaluationsmatrix für Material- und Produktentscheidungen am Beispiel Dämmstoff

Für jede Lebenszyklusphase nach DIN EN 15804, d.h. Herstellung (A1-A3), Transport (A4), Errichtung (A5), Nutzung (B1-B7) und Entsorgung (C/D), wurden geeignete Kriterien überprüft, die sich an den Nachhaltigkeitskriterien der DGNB-Zertifizierung [8] und den Daten aus der Ökobaudat [9] orientieren. Dabei wird zwischen „harten“ und „weichen“ Kriterien unterschieden.

##### „Harte“ Kriterien

„Harte“ Kriterien sind Zahlenwerte, die direkt miteinander vergleichbar sind („Äpfel-mit-Äpfel“-Vergleich). Für die Phasen A1-A5 werden die „harten Kriterien“ basierend auf Literaturwerten (hauptsächlich aus der Ökobaudat [9]) und konkreter Planungsdaten analysiert. Die „harten“ Faktoren sind:

- Die in den verschiedenen Lebenszyklusphasen benötigte Primärenergie
  - nachhaltig (PERT)
  - nicht nachhaltig (PENRT)
  - gesamt (PE Total)
  - Das Global Warming Potential (GWP)

Um die Literaturwerte auf das Projekt zu spezifizieren, sind folgende Planungsdaten notwendig:

- Die Masse oder das Volumen des Produktes
- Die verwendeten Verkehrsmittel
- Die Menge des Transportgutes
- Die Distanz vom Herstellungsort zur Baustelle

### **„Weiche“ Kriterien**

„Weiche“ Kriterien sind nicht direkt miteinander vergleichbar („Äpfel-mit-Birnen“-Vergleich) bzw. sind Aspekte mit unzureichender Datengrundlage. Zu den „weichen“ Kriterien zählen:

- Auswirkungen auf die Umwelt: Die vielfältigen Auswirkungen auf die Umwelt sind nicht direkt vergleichbar: Zum Beispiel ist eine Belastung des Grundwassers bei der Verwendung eines Material nicht direkt vergleichbar mit einer Feinstaubbelastung eines anderen Materials.
- Bedeutsame Zusatzmittel: Die Menge und die Auswirkungen von Imprägnier-, Binde-, Flammenschutzmitteln o.Ä. sind in der Regel schwer zu erfassen und die Art des Zusatzmittels ist vom jeweiligen Baustoff abhängig.
- Nutzungsdauer: Es sind nur Abschätzungen auf Basis von Zukunftsszenarien möglich.
- Rezyklierbarkeit / End-Of-Life: Es sind nur Abschätzungen auf Basis von Zukunftsszenarien möglich und die Vergleichbarkeit ist durch die Vielfalt der unterschiedlichen Rezyklierbarkeits- bzw. Entsorgungsverfahren nicht gegeben.

### **Realisierung und Bearbeitungsstand**

Anhand von Dämmstoffen sollen die Grundlagen der Methodik im Folgenden erläutert werden:

#### **Herstellung (A1-A3)**

Für die „harten“ Faktoren liefert die Ökobaudat [9] in der Regel ausreichend Daten mit wenigen Lücken. Daten der Ökobaudat werden mit anderen Quellen ([11], [12]) abgeglichen und ggf. ergänzt.

Eine vorläufige Bewertungssystematik für die „weichen“ Faktoren besteht und wird derzeit überarbeitet.

## Transport (A4)

Es werden ausschließlich „harte“ Kriterien (Primärenergie und GWP) berücksichtigt. Die Ökobaudat [9] liefert dazu ausreichend Daten. Die Referenzwerte aus dem Ökobaudat werden mit den projektspezifischen Daten verknüpft (km-Angaben, Verkehrsmittel).

## Einbau (A5)

Für die „harten“ Faktoren dieser Lebenszyklusphase liefert die Ökobaudat [9] nicht ausreichend Daten. Lediglich für Schaumglas, Steinwolle, Zellulose, Baustroh und PU-Hartschaum liegen Daten vor. Zu Interpolation der fehlenden Daten wird die Annahme getroffen, dass der Einbauprozess und nicht das Material für den Primärenergieaufwand dieser Lebenszyklusphase entscheidend ist. Grundsätzlich gibt es zwei Einbauprozesse:

### 1. Das Anbringen von Dämmplatten

In Tabelle 6 sind die spezifischen Primärenergiewerte von Plattendämmstoffen aus der Ökobaudat [9] zusammengefasst. Die Werte für Schaumglas und Baustroh liegen in der gleichen Größenordnung bei ca. 0.007-0.009 MJ/kg. Die spezifische Primärenergie für PU-Hartschaum liegt im Vergleich dazu niedriger (0.005 MJ/kg) und der Wert für Steinwolle höher (0.062 MJ/kg). Bei detaillierterer Analyse zeigt sich, dass der Bilanzraum „Einbau“ nicht eindeutig definiert ist und keine Dokumentation vorliegt, die beschreibt, welche Schritte des Einbauprozesses betrachtet werden. Lediglich beim PU-Hartschaum wird darauf hingewiesen, dass die thermische Verwertung des anfallenden Verpackungsmülls berücksichtigt wird, wodurch der niedrige Primärenergiewert erklärt werden kann.

Derzeit werden weitere Analysen durchgeführt um einen plausiblen Referenzwert für die spezifische Primärenergie für Plattendämmstoffe zu definieren.

**Tabelle 6: Übersicht der Primärenergiewerte für Plattendämmstoff (Total) für den Einbau aus [9]**

Plattendämmstoff	Spezifische Primärenergie	
	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[MJ/kg]
Schaumglas	0.806	0.007
Steinwolle	5.810	0.062
Baustroh	0.889	0.009
PU-Hartschaum	0.139	0.005

## 2. Das Einblasen von Einblasdämmstoffen

Für Zellulosefaser (Thermofloc) gibt die Ökobaudat [9] einen spezifischen Primärenergiewert von 0.003 MJ/kg an. Zur Überprüfung dieses Kennwertes wird der Energieaufwand eines Einblasvorgangs mit Hilfe von Daten einer typischen Einblasmachine [13] abgeschätzt:

- Referenzdruck 380 mbar
- Volumenstrom 250 m<sup>3</sup>/h

$$P = \dot{V} \cdot \Delta p \quad (1)$$

Mit Gleichung (1) errechnet sich eine durchschnittliche Leistung von 2,5 kW. Werden nun 250 m<sup>3</sup> Zellulosefaser innerhalb einer Stunde eingeblasen ergibt sich ein spezifischer Primärenergiekennwert von 0.04 MJ/m<sup>3</sup>. Bei gegebener Dichte entspricht das 0.001 MJ/kg und ist mit dem Wert aus der Ökobaudat vergleichbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der spezifische Primärenergiebedarf beim Einbau im Vergleich zur Herstellung deutlich geringer ist. Für den Einbau von Dämmplatten wird im Vergleich zu Einblasdämmstoffen ca. die vierfache spezifische Primärenergie benötigt.

Die Referenzdaten, werden im Laufe des Projektes durch die erfassten Daten überprüft. Dabei ist eine genaue Beschreibung des Bilanzraums „Einbau“ notwendig.

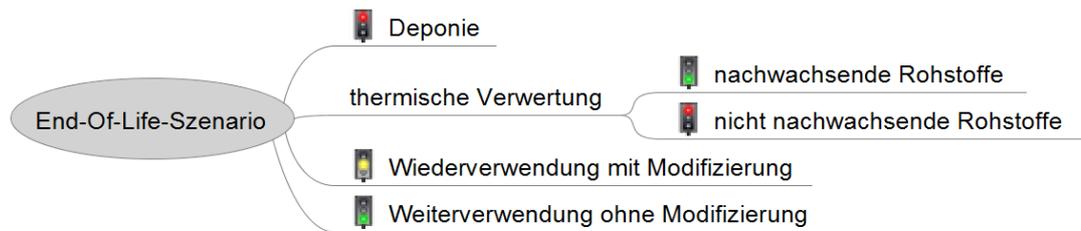
Bezüglich der „weichen“ Faktoren wird eine vorläufige Bewertungssystematik derzeit überarbeitet.

### **Nutzungsphase (B1-B7)**

Die Technische Universität München hat eine umfassende Recherche bezüglich der Nutzungsdauer und der Auswirkungen auf die Umwelt von Dämmstoffen während der Nutzungsphase abgeschlossen und analysiert diese derzeit.

### **End-Of-Life des Gebäudes (C/D)**

Da diese Lebenszyklusphase in der Zukunft liegt, werden ausschließlich „weichen“ Kriterien untersucht. Eine einheitliche Bewertungssystematik wird derzeit erarbeitet, die auf dem folgenden Ansatz basiert (siehe Abbildung 38):



**Abbildung 38: Bewertungssystematik für das End-Of-Life-Szenario. Dargestellt sind die Verwertungs- und Verwendungsmöglichkeiten eines Baustoffes am Ende der Lebenszeit eines Gebäudes mit einer Ampelbewertung**

Die Szenarien „Deponie“ und „thermische Verwertung von nicht nachwachsenden Rohstoffen“ werden als schlecht bewertet (Dargestellt durch rotes Ampellicht), weil auf diese Weise eine stoffliche Ressource aus dem System entfernt wird und so keine stoffliche Ressourcenneutralität mehr erreicht werden kann. Diese Methodik basiert auf den Grundlagen aus [4]. Das Szenario „thermische Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen“ wird als gut bewertet (Dargestellt durch grünes Ampellicht), da dadurch eine stoffliche und energetische Ressourcenneutralität erreicht werden kann. Ein Beispiel für die „Weiterverwendung ohne Modifizierung“ ist die direkte Wiederverwendung von Dämmplatten bei zerstörungsfreiem Rückbau. Sie wird als gut bewertet, da die Nutzung um einen weiteren Lebenszyklus erweitert wird. Baumaterialien, die erst nach einer Modifizierung weiterverwendet werden können (Beschrieben durch das Szenario „Weiterverwendung mit Modifizierung“), wie zum Beispiel zerkleinerte Dämmplatten als Einblasdämmstoff, werden neutral bewertet.

Diese Bewertung ist kritisch zu hinterfragen, weil an dieser Stelle die stofflichen und energetischen Effekte auf die jeweilige Bilanz detailliert betrachtet werden müssen. Je nach Verfahren und Baustoff sind die Effekte auf die energetische und stoffliche Bilanz unterschiedlich ausgeprägt, sodass ggf. eine Verwertung ressourcenschonender sein kann als die Wiederverwendung. Wird beispielsweise ein Baustoff aus nicht nachwachsenden Rohstoffen betrachtet, der mit Hilfe eines energieintensiven Verfahrens (negative Auswirkungen auf die energetische Bilanz) teilweise wiederverwendet werden kann (z.B. durch Aufschmelzen), kann dies ressourcenschonender sein, als den Baustoff thermisch zu verwerten (zwar positivere Auswirkungen für die energetische Bilanz, jedoch negativere Auswirkungen auf stoffliche Bilanz). Die Intensität der jeweiligen Effekte ist für jede Auswahloption erneut zu vergleichen.

## 4.3 Analyse der Umsetzung am Beispiel der Stampflehmwände

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte zur Herstellung der Stampflehmfassade für den Neubau Alnatura-Arbeitswelt auf dem Alnatura-Campus betrachtet, dokumentiert gemessen und beurteilt. Dies beinhaltet die Materialrecherche und die Materialauswahl, die Produktionsbedingungen, die notwendigen Infrastruktur- und Maschinenmaßnahmen, als auch die Dokumentation der Prüfergebnisse im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall.

Die Stampflehmfassade wurde auf den Längsseiten über 3 Geschosse vorgesehen, mit einer Länge von 94m und einer Höhe von 12m. Die Fassade wird alle 3,50m von einem Fensterband unterbrochen.

Ziel war es, möglichst viel des Wandaufbaus in Stampflehm auszuführen, um alle Eigenschaften des Materials innen wie außen zur Geltung zu bringen. Daher wurde ein 2-schaliges System mit einer Kerndämmung und einer Gesamtwandstärke von 69cm gewählt. Die innere Schale besteht aus 14cm Stampflehm mit einer integrierten Wandheizung, die äußere hat eine Stärke von 38cm. Die Kerndämmung wurde aus einem Schaumglasgranulat hergestellt mit einer Stärke von 17cm.

Die Stampflehmfassade wurde als sich selbst tragende Konstruktion ausgeführt und an den Betondecken bzw. am Dachtragwerk verankert. Sie wurde in vorgefertigter Elementbauweise hergestellt. Die Produktion der Elemente fand in den ehemaligen Werkhallen des Kasernengeländes statt, bevor sie dann abgerissen wurden. Die Hallen liegen unmittelbar in der Nähe des zu errichtenden Gebäudes. Die Elemente wurden zum Trocknen auf dem Baugelände gelagert und je nach Baufortschritt sukzessive zum Gebäude transportiert und mit entsprechenden Hebemaschinen und einer speziell entwickelten Anhängervorrichtung versetzt. Durch Nacharbeiten der Fugen (Retuschieren) wurden die Elemente zu einem monolithischen Gesamtbild gefügt. Insgesamt hat die Fassade eine Fläche von 1417 m<sup>2</sup> und eine Anzahl von 384 Elementen.

Die folgenden Kapitel basieren auf dem Inhalt des Papers von Nanz et al. [14].

### 4.3.1 Beschreibung des Materials Lehm und der Materialzusammensetzung

Lehm ist ein Naturbaustoff und kommt in verschiedenen Zusammensetzungen unter der oberen Humusschicht in allen Teilen der Welt vor. Lehm besteht aus Ton, Schluff und Sand und entsteht aus der Zerstörung anderer Gesteine. Kaum ein Lehm gleicht dem anderen. Der Sand-, Schluff- und Tonanteil sowie die Tonart ist sehr entscheidend für

die Baueigenschaften des Lehms. In feuchtem Zustand ist Lehm, je nach Zusammensetzung, ein mehr oder weniger bildsamer Baustoff, der durch Lufttrocknung hart und tragfähig wird.

Bei der Stampflehmtechnik ist auch ein gewisser Steinanteil notwendig. Der Lehmanteil bildet das bindende und der Steinanteil mit der Körnung 0-32mm das tragende Element. Daher ist es von großem Vorteil, wenn in dem bindigem Grundmaterial bereits ein gewisser Steinanteil vorhanden ist. Zum einen lässt sich das Material dann besser aufbereiten und es müssen weniger Steine hinzugefügt werden.

Für ein Projekt in der Größenordnung wie Alnatura, 1417 m<sup>2</sup> Fassade und ca. 1600 t Material, ist es wichtig, Bezugsquellen zu finden, die ausreichend Material in der gleichen Qualität garantieren. Hierfür muss im Vorfeld eine lokale Materialrecherche durchgeführt werden. Bezugsquellen können Ziegeleien (Lehmgruben), Kieswerke (Schotter) oder auch Steinbrüche (Abraummaterial) sein. Gerade Steinbrüche haben oft Abraummaterial. Dieses Material ist weder für die Schotterindustrie interessant, da der Lehmanteil zu hoch ist und aufwendig ausgewaschen werden müsste, noch für die Ziegelindustrie, da es einen zu hohen Steinanteil hat. Für die Stampflehmtechnik ist es die ideale Mischung und kann durch Sieben und Brechen auf die richtige Korngröße gebracht werden.

Lehm erlaubt in idealer Weise einen natürlichen Alterungsprozess, nicht zuletzt durch die Lichtechtheit der Erdpigmente. Durch die geringe Gleichgewichtsfeuchte von 6-7% und die feuchtigkeitsaktive Wirkung des Lehms, sprich das schnelle Austrocknen nach einem Regenfall, können sich Mikroorganismen wie Pilzbefall, Moose und dergleichen nicht bilden. Die Fassaden zeigen über Jahrzehnte hinweg kaum Farbänderungen. Bei technisch einwandfreier Ausführung von Kanten und Flächen ist nur eine natürliche Erosion zu erwarten, die durch konstruktive Maßnahmen, wie den Einbau von Mörtelleisten, die den Wasserfluss bremsen (Erosionsbremsen), zu einer kalkulierbaren Erosion wird. Wartungs- und Unterhaltmaßnahmen bzw. eine Generalsanierung sollte über Jahrzehnte nicht notwendig sein.

Das Material, das im Alnatura Projekt verwendet wurde, ist ein Kalkgestein, das aus einer Tunnel-Großbaustelle entnommen wurde. Das Aushubmaterial wurde von der lokalen Baufirma gesiebt (0-32mm) und das ausgesiebte Material zu einem Schotter mit der Körnung 0-32mm gebrochen. Das sogenannte Vorabsiebmaterial ist ein bindig steiniges Material und stellte die Basis für die Alnatura-Mischung dar. Um den Steinanteil zu erhöhen wurde ein Teil des gebrochenen Schotters wieder dazu gemischt. So konnte der Großteil des Aushubmaterials und der gesamte für die Schotter- und Ziegelindustrie nichtbrauchbare Teil verwertet werden.

Die Schwierigkeit hier bestand nicht darin, die ausreichende Menge an Material zu finden, sondern den verantwortlichen Betreiber und die richtige Qualität in einem hoch komplexen Firmenkonstrukt. Gerade bei den bindigen Aushüben, die nicht zu Schotter verarbeitet werden können, war die Bereitschaft seitens der Betreiber sehr groß, diese abzugeben. Bei solchen Großprojekten liegt ein immenses Potential sehr gutes Baumaterial in großen Mengen für die Stampflehmtechnik zu generieren und eine sinnvolle Verwendung für die immensen Aushubmengen zu finden. Das Alnatura Projekt stellt in dem Zusammenhang ein Pilotprojekt dar und zeigt, was alles mit diesen Materialmengen gebaut werden könnte. Aus diesem Grund wurde auch der längere Transportweg zur Baustelle in Kauf genommen.

Das Aushubmaterial ist das Basismaterial für die Alnatura Stampflehmmischung und wurde durch verschiedene Komponenten ergänzt. Für die Erhöhung der Bindigkeit wurden ein gelblicher Lehm und ein gelbliches Tonpulver, für die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit ein Lavaschotter und für die Erhöhung des Steinanteils ein Kies 10/16 hinzugefügt.

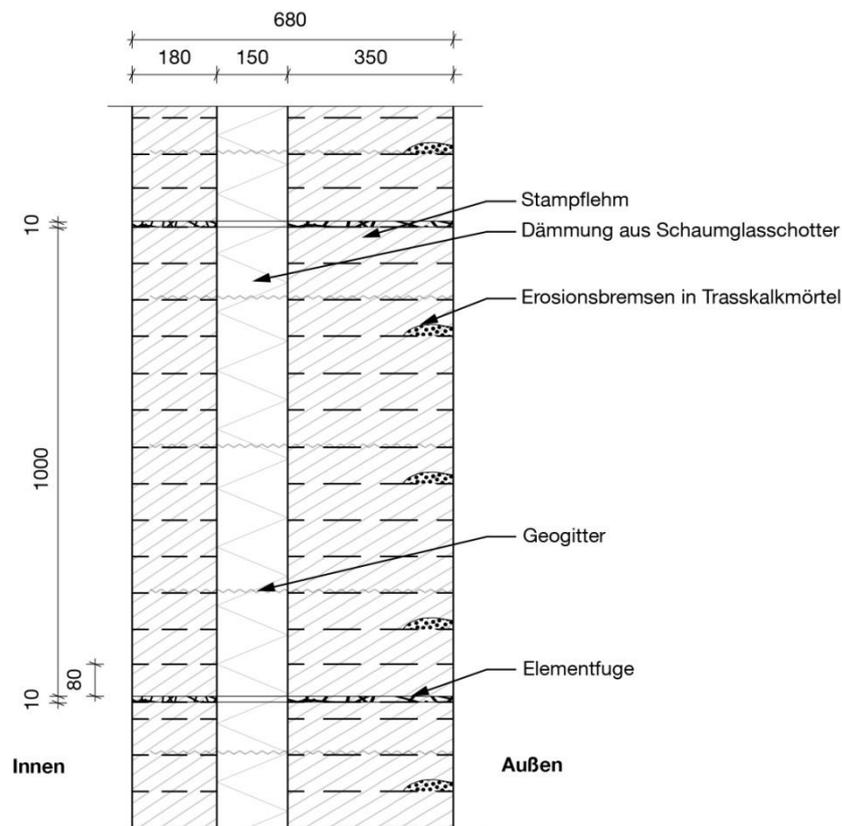


Abbildung 39: Aufbau Außenwand

Für die Kerndämmung wurde ein Schaumglasgranulat mit der Körnung 10/75mm verwendet. Das Granulat zerbricht beim Stampfen und verzahnt sich dadurch sowohl untereinander als auch mit dem Lehm. Durch dieses Verzahnen bekommt das 2-schalige Gesamtgefüge eine gute Verbindung mit der Dämmung. Ergänzend wurde alle 30cm ein Geogitter über die gesamte Breite eingelegt. Schaumglasgranulat ist zertifiziert und erfüllte die Werte für die notwendige Wärmeleitfähigkeit zur Einhaltung des erforderlichen U-Wertes.

Geplant war ein natürliches Dämmmaterial (siehe Alnatura I). Im Planungsprozess kam Bimsstein in Frage, der jedoch aufgrund der fehlenden Bindigkeit bzw. Verzahnung des Materials nicht verwenden konnte. Bei einer Zumischung von Tonpulver konnte die notwendige Bindigkeit erreicht werden, allerdings nahm dadurch auch die Wärmeleitfähigkeit zu, was zu einer Verschlechterung des U-Wertes führte. Zudem ist der Wert der Wärmeleitfähigkeit des Bimssteins, in der Form, nicht zertifiziert. Dies hätte weitere Laborprüfungen erforderlich gemacht inkl. vorgeschriebener Sicherheitsaufschläge, die die Erreichbarkeit des Wertes nicht möglich machten. Hier liegt noch Entwicklungspotenzial.

#### **4.3.2 Stoffwerte, Genehmigungen und Prüfverfahren**

Nachdem für lastabtragende und aussteifende Stampflehmwände derzeit noch in den wenigsten Fällen klare baurechtliche Rahmenbedingungen und verbindliche Normwerte gegeben sind, ist in Deutschland in der Regel eine Zustimmung im Einzelfall zu erwirken. Die zu erbringenden Kennwerte richten sich nach den Anforderungen der Statik und Bauphysik und werden mit den Fachplanern und einem Gutachter abgestimmt. Da die Stampflehmwand in diesem Projekt auch eine Außenwand ist, wurden sowohl feuchte-technische Werte für eine hygrothermische Simulation zur Ermittlung der Durchfeuchtung der Wand als auch die Werte der Wärmeleitfähigkeit für die U-Wertberechnung ermittelt. Versuche zur Bestimmung der Rohdichte, der Porosität, der Wärmekapazität- und Leitfähigkeit, der Diffusionswiderstandszahl und Wasseraufnahmefähigkeit wurden beim Fraunhofer Institut durchgeführt.

**Tabelle 7: Stoffgrößen Stampflehm**

Stoffgröße	Einheit	Wert
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2150
Porosität	[-]	0,23
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	[W/mK]	0,70
Spezifische Wärmekapazität $c_p$	[kJ/kgK]	0,85
U-Wert	[W/m <sup>2</sup> K]	0,35
Diffusionswiderstandszahl $\mu_{dry}$	[-]	23
Diffusionswiderstandszahl $\mu_{wet}$	[-]	12
Wasseraufnahmekoeffizient $W$	[kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]	3,60
Masse pro m <sup>2</sup> Fassade	[t/m <sup>2</sup> ]	1,28

#### 4.3.3 Produktionsabläufe, Infrastruktur und Maschineneinsatz

Die Produktion der Stampflehmfassade fand auf dem Baugelände in einer ehemaligen Werkhalle (Panzerhalle) der Kelley Barracks statt. Hierfür wurde in der Halle eine 35 m lange Schalung aufgestellt auf der oberhalb eine Befüllungs- und Stampfmaschine (Beschicker) fuhr. Das Material wurde schichtweise mit Hilfe des Beschickers in die Schalung gefüllt und anschließend mit einem Stampfroboter verdichtet. Die zwei Stampflehm-schalen und die Kerndämmung wurden gleichzeitig in die Schalung gefüllt. Eine gestampfte Schicht hat eine Höhe von ca. 7,6cm. Die gesamte Wandstärke beträgt 69cm. Gleichzeitig wurden in jede Schicht Leitungen eingelegt, die später für die Wandheizung genutzt wurden. Es wurde immer eine Wandlänge von ca. 30m in einem Stück gestampft und nach dem Ausschalen in die entsprechenden Elementlängen geschnitten. Ein Stampfgang ergab eine Anzahl von 8 Elementen mit einer Höhe von 98,5cm. Die Elemente wurden nummeriert und mit dem Hallenkran und einem dafür entwickelten Hebe-gerät aus der Schalung genommen und zum Trocknen gelagert.

Die Halle war für diese Art der Produktion etwas zu klein, konnte aber mit einer geringen Maßnahme ausreichend erweitert werden. Die robuste Konstruktion der Halle ermöglichte die Installation eines Hallenkrans, welcher Voraussetzung für eine solche Produktion ist.

Die 35 m lange Schalung und die Befüllungs- und Stampfmaschine können flexibel eingesetzt werden. Sie sind nicht ortsgebunden und können überall wie eine Feldfabrik aufgebaut werden. Dies ermöglicht neben der Verwendung von lokalen Lehmmaterialien (s. Kapitel 4.3.1) auch eine Produktionsstätte nahe der Baustelle. Dadurch können auch bei einer Bauweise mit vorgefertigten Elementen die Transportwege sehr gering gehalten werden. Bei diesem Projekt konnten die Transportwege zur Baustelle sogar vermieden werden, da die Produktionsstätte sich auf dem Baugelände befand.

### **Lagerung und Trocknungsprozess**

Zum Trocknen wurden die Elemente mit einem Gabelstapler zur Lagerhalle gefahren. Als Lagerhallen dienten zwei temporär auf dem Baugelände direkt neben der bestehenden Halle errichteten Zelte. Die Zelte mussten in den Wintermonaten frostfrei gehalten werden, um ein Durchfrieren der noch feuchten Elemente zu vermeiden. Der Trocknungsprozess eines Elements in dieser Stärke beträgt ca. 1,5 Monate bevor es zur Baustelle geliefert werden kann.

Der Vorteil von Lehmelementen ist, dass sie auf natürliche Weise an der Luft getrocknet werden können. Sie müssen lediglich gegen Regen geschützt und frostfrei gehalten werden. Ein Bau im Sommer reduziert den Energiebedarf für etwaige Winterbaumaßnahmen, um die Trocknungszelte frostfrei zu halten.

### **Versetz- und Retuschierarbeiten**

Nach dem Trocknungsprozess wurden die Elemente nach Bedarf und Baufortschritt zum Versetzungsort gefahren. Aufgrund der kurzen Distanz konnte dies mit einem Gabelstapler erfolgen. Die Elemente wurden mit einem Autokran und einem speziell entwickelten Hebegerät versetzt. Die Montage- und Retuschierarbeiten wurden mit selbstfahrenden Hebebühnen durchgeführt.

Die Fassade wurde lediglich alle 4m gegen Knicken an die Geschoßdecken verankert, ansonsten trägt sich die Fassade selber. Die Plastizität des Lehms ermöglicht es, die Fugen nach dem Versetzen zu retuschieren, sodass eine monolithische fugenlose Stampflehmfassade entsteht.

Aufgrund der kurzen Distanz zum Elementlager und der Produktionsstätte konnten sowohl die Transportwege, als auch die logistische und terminliche Abstimmung der Lieferung extrem gering und einfach gehalten werden.

#### **4.3.4 Datenerfassung Rohstoffgewinnung Modul A1**

Da die Rohstoffgewinnung der Baustoffe bei externen Zulieferern erfolgte, war keine Messung des Energiebedarfs zur Rohstoffgewinnung möglich. Folglich wurde der Primärenergiebedarf des Moduls A1 mit Hilfe einer Literaturstudie quantifiziert. Alle Materialien, wie Rohmaterial (z.B. Aushub) und verarbeitete Baustoffe (z.B.: das Geogitter) wurden berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

#### **4.3.5 Datenerfassung Messkonzept A2-A5**

Die Stampflehmwände werden direkt vor Ort auf der Baustelle gefertigt. Dazu ist eine Produktionseinheit auf einem ehemaligen Kasernengelände bestehend aus

- einem Eingangsfracht-Bereich,
- der Materialaufbereitung,
- der Produktionsanlage,
- einem Lager/Trocknen-Bereich,
- und einer Versetz-Einheit,

installiert worden (siehe Abbildung 40). Die Stampflehmwände werden elementar gefertigt. Es werden 364 Elemente in 48 Schalungsabschnitten bzw. Stampfgängen vorgefertigt. Ein Stampfgang dauert ca. 2 – 3 Tage: Der erste Stampfgang wurde Ende August 2016 gefertigt. Bis Mitte Februar 2016 sollen alle Stampfgänge erfolgt sein. Zur Erfassung der grauen Energie liegt folgendes Konzept vor (siehe Abbildung 41)

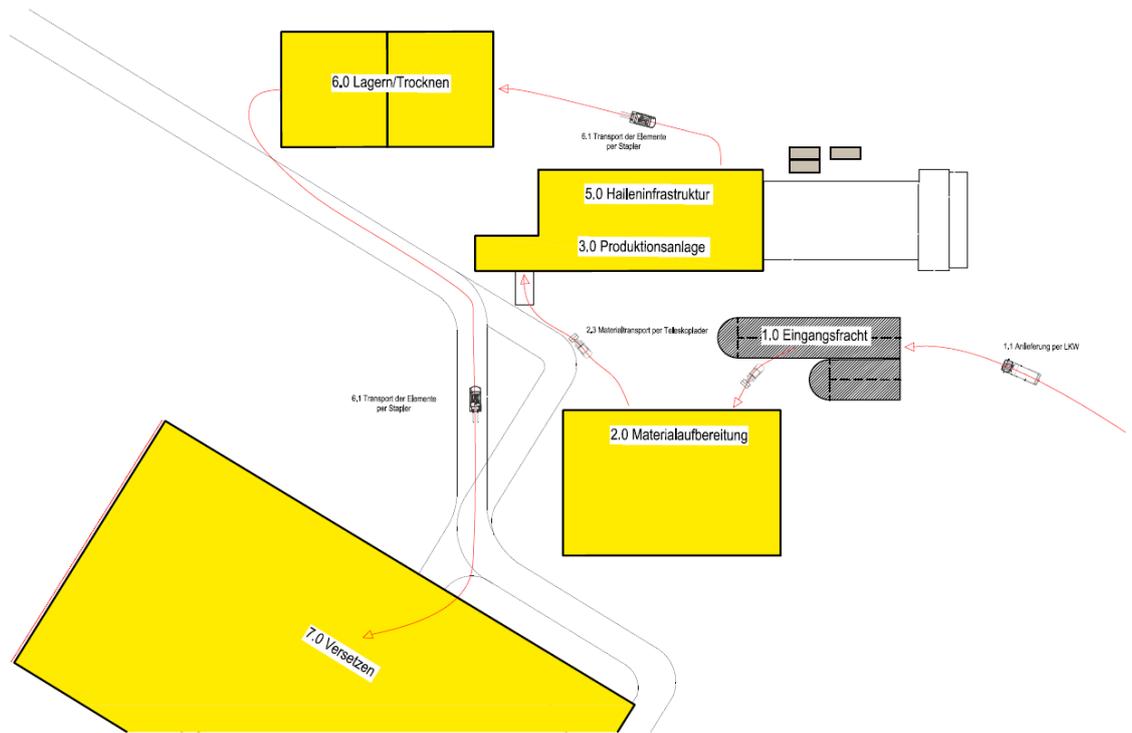


Abbildung 40: Produktionsprozess der Stampflehmwandelemente

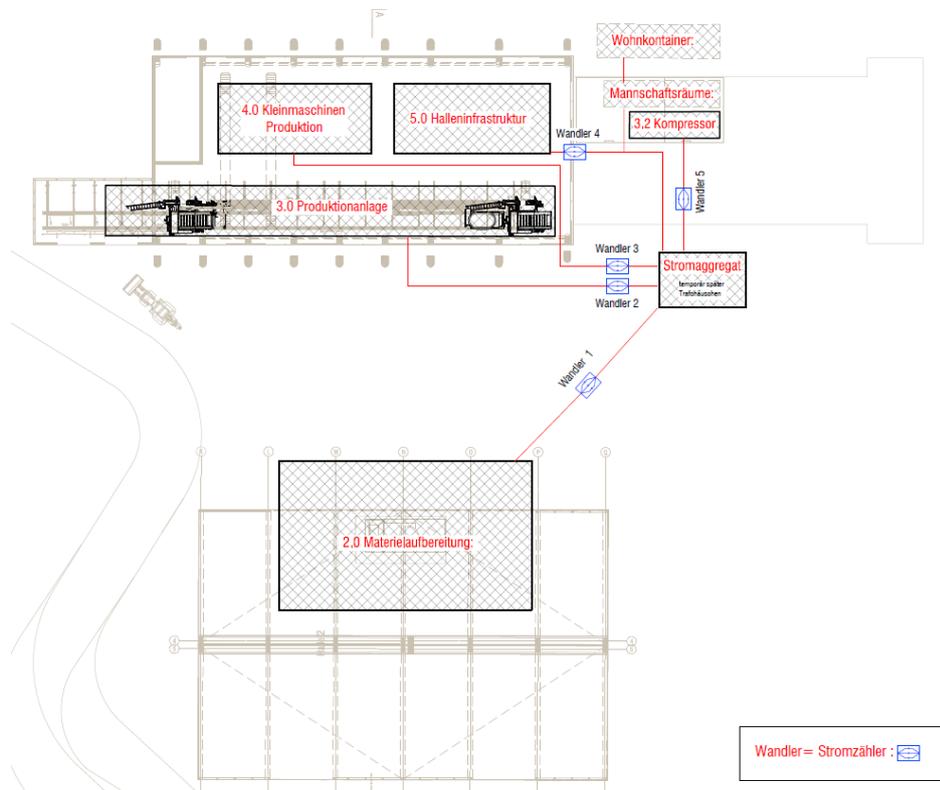


Abbildung 41: Schema zur Erfassung des Stromverbrauchs für den Produktionsprozess der Stampflehmwandelemente

**Tabelle 8: Datenerfassung des Realisierungsprozesses der Stampflehmfassade**

Erfassung über	
<b>A2</b>	<b>Transport zur Produktion</b>
Materialtransporte	Lieferscheine
<b>A3</b>	<b>Materialaufbereitung</b>
Mischmaschine	Stromzähler 1 (siehe Abbildung 41)
Materialwender	Stromzähler 1 (siehe Abbildung 41)
Teleskoplader	Dieserverbrauch und Betriebsstundenzähler
<b>A3</b>	<b>Produktionsanlage</b>
Beschicker mit Stampfroboter und Schneideeinheit	Stromzähler 2 (siehe Abbildung 41)
Kompressor	Stromzähler 5 (siehe Abbildung 41)
<b>A3</b>	<b>Lagern/Trocknen</b>
Gabelstapler	Dieserverbrauch und Betriebsstundenzähler
Heizen nach Bedarf	Dieserverbrauch und Betriebsstundenzähler
<b>A4</b>	<b>Transport zur Baustelle</b>
Produktion auf Baustelle siehe A2	
<b>A5</b>	<b>Versetzen</b>
Autokran	Dieserverbrauch und Betriebsstundenzähler
Scherenhebebühne	Dieserverbrauch und Betriebsstundenzähler
Kleinmaschinen	Allgemeiner Baustrom (Details werden noch geklärt, Verbrauch sehr gering)

Der gesamte Primärenergiebedarf (PE) setzt sich zusammen aus erneuerbarer Primärenergie (PERT) und nicht erneuerbarer (PENRT) Primärenergie.

$$PE = PERT + PENRT \quad (1)$$

Die verwendeten Primärenergiefaktoren sind in Tabelle 9 gelistet. Die Primärenergie für den Transport ( $PE_{Transport}$ ) berechnet sich aus dem Produkt der Masse  $m$  in kg, die über eine Distanz von  $x$  in km transportiert wurde, multipliziert mit dem Primärenergiefaktor des Transportmittels  $f_{Transportmittel}$ . Die Transporte wurden überwiegend mit einem LKW mit einer durchschnittlichen Nutzlast von 24 t durchgeführt (Ökobaudat 2017, Datensatz 9.3.01)

$$PE_{Transport} = x \cdot m \cdot f_{Transportmittel} \quad (2)$$

**Tabelle 9: Primärenergiefaktoren**

<b>Energieträger</b>	<b><math>f_{PE}</math> [-]</b>	<b>Quelle</b>
Deutscher Strommix	2.80	[15]
Diesel	1.22	[16]
<b>Transportmittel</b>	<b><math>f_{PE}</math> [MJ/1000kgkm]</b>	
LKW (Nutzlast 24 t)	0.74	[9]

Sonderbaumaßnahmen, wie z.B.: Frostschutz, werden zur besseren Vergleichbarkeit aus der Betrachtung genommen.

#### **4.3.6 Bewertung der grauen Energie**

Wie im Vorgängerprojekt „Alnatura I“ [4] und um den Erkenntnistransfer zu erleichtern, werden die Ergebnisse werden auf 1 m<sup>2</sup> Fassadenfläche bezogen. Die Messung ist feinteiliger, d.h. für jeden einzelnen Produktionsschritt (außer der Rohstoffgewinnung) durchgeführt und dokumentiert, im Gegensatz zum aktuell vorliegenden Literaturwert der Ökobaudat. Dort liegt nur ein aggregierter Wert für die Module A1-A3 vor. Es sind keine weiteren Informationen oder Annahmen, wie zum Beispiel Transportdistanzen, angegeben, sodass aus einem aggregierten Datensatz die einzelnen Module nicht eindeutig

abgeleitet werden können. Der aktuelle Literaturwert für die Module A1-A3 liegt 125,4 MJ/t PENRT und 3,2 MJ/t PERT. Bezogen auf die untersuchte Wand und unter Berücksichtigung des Geogitters und des Schaumglasschotters resultiert daraus ein Literaturwert von 395 MJ/m<sup>2</sup>. Zum Vergleich berechnet sich für eine thermisch vergleichbare Ziegelwand mit einem Wärmedämmverbundsystem (24 cm Ziegel, U-Wert von 0,34 W/m<sup>2</sup>K) ein Primärenergiebedarf von 500 MJ/m<sup>2</sup> basierend auf den Werten aus der Ökobaudat.

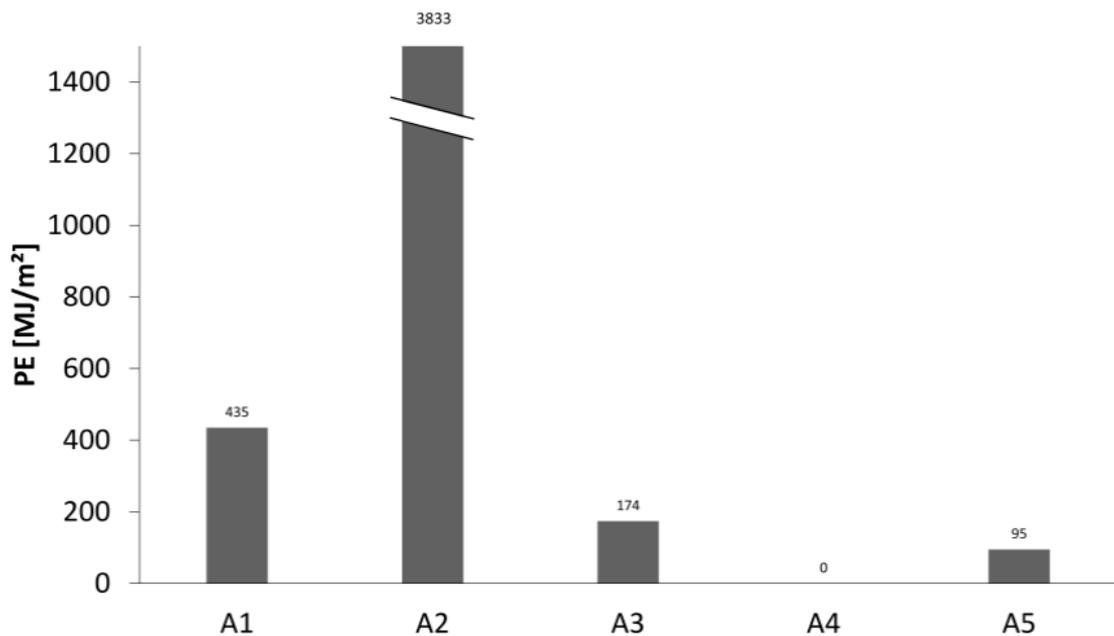
Die Ergebnisse der Literaturrecherche für die Rohstoffgewinnung (Modul 1) ergeben einen Primärenergiebedarf von 435 MJ/m<sup>2</sup>. Der Primärenergiebedarf der einzelnen Rohstoffe ist in Tabelle 10 dokumentiert. Die meisten dieser Werte beziehen sich auf die Ökobaudat. An dieser Stelle wird deutlich, dass weitere Informationen zum Prozess und zur Aufteilung in die einzelnen Module wichtig sind, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen.

**Tabelle 10: Quantifizierung des Primärenergiebedarfs in Modul A1 basierend auf Literaturwerten**

<b>Baustoff</b>	<b>Massenanteil [%]</b>	<b>PE [%]</b>	<b>Quelle</b>
Aushubmaterial	58.51	0.00	N/A, Recyclingmaterial
Lehm	8.70	1.04	Aushub [9], Aufbereitung (Zulieferangaben)
Lehmpulver	2.59	11.25	[9], 1.1.04 Lehmpulver
Mergel	14.55	2.09	[9], 1.2.01 Kies 2/32
Sand	2.76	0.40	[9], , 1.2.01 sand 0/2
Trasskalk	0.45	1.90	EPD-RHT-2011111-D
Geogitter	0.10	30.72	[9], , 6.6.07 Fortrac® T
Lavaschotter	9.55	8.09	[9], , 1.2.02 Schotter 2/15
Schaumglasschotter	2.80	44.51	EPD-MIS-20150019-IAA1-DE
<b>Total PE [MJ/m<sup>2</sup>]</b>		<b>434.62</b>	

Bei der Produktion der Stampflehmelemente in Modul A3 bestehend aus Misch- und Stampfprozess fallen 174 MJ/m<sup>2</sup> an. Der Hauptbestandteil, mit 97 % der Primärenergie, wird durch das Mischen verursacht. Die Produktion der Stampflehmwände ist sehr energieeffizient, da die Rohstoffe nicht, wie bei Ziegel, gebrannt oder, wie bei Beton, weiterverarbeitet werden.

Die Ergebnisse der grauen Energie, aufgeteilt in die einzelnen Module A1-A5 ist in Abbildung 42 dargestellt.



**Abbildung 42: Graue Energie der Stampflehmwand aufgeteilt nach Modulen**

Zu sehen ist, dass der Hauptanteil des Primärenergiebedarfs beim Transport zur Produktionseinheit in Modul A2 anfällt. Das liegt daran, dass 1061 Tonnen Aushubmaterial unter Berücksichtigung aller Transportwege 9143 km transportiert wurden. Das entspricht einem Primärenergiebedarf von 5200 MJ/m<sup>2</sup>. Dieses Aushubmaterial stammt von einer 223 km entfernten Tunnel-Baustelle. Das Aushubmaterial wurde durch den Bau der Stampflehmfassade upgecycelt anstatt deponiert. Dies wird in einer ganzheitlichen Betrachtung berücksichtigt, sodass der Primärenergiebedarf, der zum Transport zur Deponie (nach Herstellerangaben mit einer Distanz von 60 km) angefallen wäre, abgezogen wird. Dadurch reduziert sich der Primärenergiebedarf auf 3833 MJ/m<sup>2</sup>. Wie zeigt, resultiert der hohe Primärenergiebedarf zu 97 % durch den weiten Transport der großen Masse von Aushubmaterial.

Da die Produktionseinheit sich auf der Baustelle befindet, fällt kein Primärenergiebedarf in Modul A4 an. Die Summe der Transportmodule, A2 und A4, entspricht mehr als 84 % am gesamten Primärenergiebedarf aus.

Die Ergebnisse belegen die Wichtigkeit lokalen Materialien zu nutzen und Transportdistanzen zu reduzieren. Insbesondere der Baustoff Lehm eignet sich lokale Materialien zu nutzen, da Aushubmaterial meist ohne Aufbereitung genutzt und die Produktion flexibel installiert werden kann. Lehmvorkommen gibt es überall auf der Erde. Jedes Bauvorhaben kann mit lokalem Lehm ausgeführt werden. Je nach Lehmbeschaffenheit haben sich regional verschiedenen Lehmtechniken entwickelt. Beim Alnatura Projekt wurde bei der Recherche geeignetes Material in einem 25 km entfernten Steinbruch gefunden. Das Material hatte die regional typische rotbraune Färbung. Dennoch wurde eine gelbliche Farbe gewünscht, sodass die Recherche ausgedehnt wurde, da diese Farbe regional nicht vorkommt. Im Rahmen dessen wurde das Aushubmaterial der bereits erwähnten Tunnel-Großbaustelle als geeignetes Material gefunden.

Bezogen auf die Fahrleistung werden 75 % durch die Massen- und Transportströme für Aushub, Hinterfüllung und Schotterlieferung und Deckenbauteile (Transportbeton) verursacht [17]. Folglich, führt die direkte Nutzung des Aushubmaterials für den Bau einer Stampflehmwand zu signifikanten Energieeinsparungen.

Um zukünftig möglichst ressourcenneutral zu bauen, muss das Design an die lokalen Baustoffe angepasst werden.

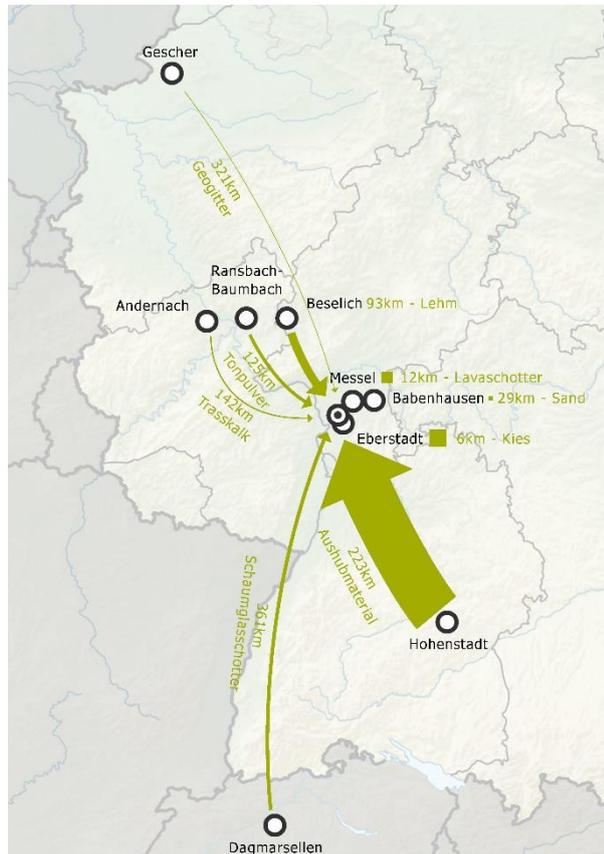


Abbildung 43: Transportdistanzen der Rohstoffe

Tabelle 11: Transportdistanzen der einzelnen Rohstoffe der Stampflehmwand und dem daraus resultierenden Primärenergieanteil

Zusammensetzung	Transportdistanz A2 [km]	PE-Anteil [%]
Aushubmaterial	223	97.35
Lehm	93	1.18
Lehmpulver	125	0.18
Mergel	6	0.17
Sand	29	0.03
Trasskalk	142	0.01
Geogitter	321	0.02
Lavaschotter	12	0.15
Schaumglasschotter	361	0.92
<b>Total PE [MJ/m²]</b>		<b>3833</b>

#### 4.3.7 Bewertungsmatrix/Evaluation

Basierend auf den vorangegangenen Untersuchungen lassen sich die einzelnen Parameter des Baustoffs Lehm sehr anschaulich bewerten und darstellen:

Energiebedarf	Mäßig. Lehmbauweisen sind in der Produktion sehr arm. Durch den weiten Transport des Aushubmaterials hätte der Energiebedarf jedoch um 84 % gesenkt werden können
Rezyklierbarkeit	Sehr gut Bauschutt einer Großbaustelle wurde upgecycelt, der sonst deponiert worden wäre.
Trennbarkeit	Gut . Die Plastizität des Lehms ermöglicht es, die Fugen nach dem Versetzen zu retuschieren, sodass eine monolithische fugenlose Stampflehmfassade entsteht. Der Lehm ist am Ende wieder zu 100% rückführbar. Durch Sieben kann der Lehm vom Schaumglasschotter getrennt werden.
Schadstoffe	Sehr gut. Keine Schadstoffe vorhanden.
Lokale Rohstoffe	Mäßig. Lokaler Stampflehm wurde aus ästhetischen Gründen nicht verwendet.

## 5. Phase 2: Monitoring, Gebäudebetriebs und Optimierung

### 5.1 Monitoring

Das Gebäude soll in Phase II in einem Monitoring messtechnisch untersucht werden.

#### 5.1.1 Konzept

Ein Messkonzept wurde im Rahmen der Planung entwickelt, um zu untersuchende Größen aufzunehmen. Von Transsolar wurde bereits ein vorläufiges Zählerkonzept entwickelt, dessen wesentliche Aspekte im Folgenden kurz vorgestellt werden:

#### Wetterstation

Die Wetterstation wurde an einer geeigneten Stelle auf dem Dach des Gebäudes installiert.

Tabelle 12: Wetterstation Messgrößen

Bezeichnung	Messbereich	Genauigkeit
Außenlufttemperatur	-25 - 50 °C	± 0.25 K
Rel. Luftfeuchte	10 - 100 %	±2 %
Beleuchtungsstärke	0 - 100Klux	± 200 lux
Niederschlag		
Windgeschwindigkeit	0 - 30 m/s	± 0.25 m/s
Windrichtung	0 - 359 °	

#### Wärme- und Kälteverbraucher

Für die Aufnahme der Wärme- und Kältemengen werden Wärmemengenzähler eingesetzt werden (Sensorpositionen siehe Abbildung 123 bis Abbildung 125 im Anhang).

**Tabelle 13: Wärme- und Kälteverbraucher Messgrößen**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Messbereich</b>	<b>Genauigkeit</b>
Vorlauftemperatur	<b>0 - 50 °C</b>	<b>± 0.1 K</b>
Rücklauftemperatur	<b>0 - 50 °C</b>	<b>± 0.1 K</b>
Volumenstrom	<b>siehe oben</b>	<b>± 1%</b>
Wärmemenge		

### **Erdkanäle**

Für die Bewertung der Vorwärm- und Vorkühlfunktion der beiden Erdkanäle wird als Eintrittstemperatur die Außentemperatur der Wetterstation herangezogen. Als Austrittstemperatur aus dem Erdkanal werden die Eintrittstemperaturen in die Lüftungsgeräte verwendet.

### **Stromverbrauch**

Die elektrische Energie ist mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\%$  zu messen. Der Messbereich ist entsprechend dem zu erwartenden elektrischen Leistungsbedarf des zu vermessenden Objekts auszulegen.

**Tabelle 14: Messgrößen zur Bewertung des Stromverbrauchs**

<b>Bezeichnung</b>	<b>Messbereich</b>	<b>Genauigkeit</b>
Elektrische Energie	<b>siehe oben</b>	<b>± 1 %</b>

Für die Bewertung des elektrischen Energiebedarf, sowie der Effizienz der haustechnischen Anlagen soll der elektrische Energiebedarf differenziert aufgenommen werden. Folgende Verbraucher sollen differenziert werden:

- Wärmepumpe (Verdichterleistung),
- Lüftungsanlagen (Ventilatorleistung)
- Pumpenstrom,

- Kunstlicht,
- Nutzerstrom

## Komfort

Im Rahmen des Monitoring sollen die thermischen Komfortbedingungen im Gebäude überwacht und analysiert werden.

Hinsichtlich des Raumkomforts werden Zielwerte gemäß der DIN15251 nach dem adaptiven Komfort Kategorie II angestrebt.

Als Indikatoren für den thermischen Komfort dienen die Lufttemperatur und die Luftfeuchte. Diese Größen sind in jedem geschlossenen Raum, im offenen Luftraum sind an Referenzpunkten in unterschiedlichen Etagen, zu messen Für die Bewertung der Luftqualität sind in repräsentativen geschlossenen Räumen die CO<sub>2</sub> Konzentrationen aufzunehmen (Sensorpositionen siehe Abbildung 123 bis Abbildung 125 im Anhang).

**Tabelle 15: Messgrößen zur Bewertung des Raumkomforts**

Bezeichnung	Messbereich	Genauigkeit
Raumlufttemperatur	0 - 50 °C	± 0.2 K
Rel. Luftfeuchte	10 - 100 %	± 2 %
CO <sub>2</sub>	0 - 5000 ppm	± 5 %

## Indoor Climate Messungen

Parallel zu den Messungen über das Gebäudeleitsystem wurden von der TUM 12 unabhängige Messeinrichtungen zur Aufnahme von Lufttemperatur, Luftfeuchte und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Innenraum installiert. Bei den verwendeten Geräten handelt es sich um Indoor Climate Meter (IC-Meter), die im Mai 2019 im Gebäude installiert wurden. Diese dienen dem Monitoring des Innenraumklimas und der Auswertung des Nutzerkomforts im Gebäude.

IC-Meter bestehen aus einer Messeinheit (IC-Meter Box), die mit Sensoren für Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Geräuschpegel ausgestattet ist. Die Daten werden über lokale Server übertragen und sind online abrufbar. Das Messintervall wurde auf 5 min eingestellt.

Tabelle 16: IC-Meter-Messeinheit; Quelle: <https://www.ic-meter.com>

Messgerät	Indoor Climate Meter (IC-Meter)
Messbereich Temperatur	-20 – 80 °C
Auflösung Temperatur	0,01 °C
Messunsicherheit Temperatur	±0,3 K
Messbereich CO <sub>2</sub>	0-95 % RH
Auflösung Geschwindigkeit	0,04 % RH
Messunsicherheit Feuchte	+/- 2% RH
Messbereich CO <sub>2</sub>	400-2000 ppm
Messunsicherheit CO <sub>2</sub>	+/- 5%



Die Lage der einzelnen IC-Meter Boxen in den Grundrissen (EG, OG1, OG2) ist im Anhang in Abbildung 123 bis Abbildung 125 dargestellt. Die Lage der GLT-Sensoren ist im Hinblick auf einen Vergleich der Daten in den Plänen auch sichtbar.



Abbildung 44: IC-Meter-Messungen in der Alnatura-Arbeitswelt

### Strom-Messungen an Arbeitsplätzen

Weiterhin hat die TUM ein Messkonzept für die Erfassung des Stromverbrauchs an einzelnen ausgewählten Arbeitsplätzen im Gebäude aufgestellt und umgesetzt. Ziel sind eine Analyse des Nutzerverhaltens und eine Hochrechnung des Verbrauchs für alle Arbeitsplätze.

Das Messkonzept beruht auf der Nutzung von DECT-Steckdosen (Fritz!DECT 210, siehe Tabelle 17), die den Stromverbrauch der angeschlossenen Geräte im 15-Minuten-Takt erfassen und an die verbundenen Router (Fritz!Box) übermitteln. Die Router senden dann einmal täglich die Daten in Form einer CSV-File (eine Datei je Messstelle)

an die TUM über einer LTE-Verbindung. Diese Lösung ermöglicht die Ablesung der Messdaten „aus der Ferne“.

Tabelle 17: Fritz!DECT 210; Quelle: <https://avm.de/>

	<b>Messgerät</b>	<b>Fritz!DECT 210</b>
	Messbereich Strom	0-3450 W
	Messunsicherheit Temperatur	+/- 100mW (bis 5 Watt) bzw. +/- 2% (ab 5 Watt)

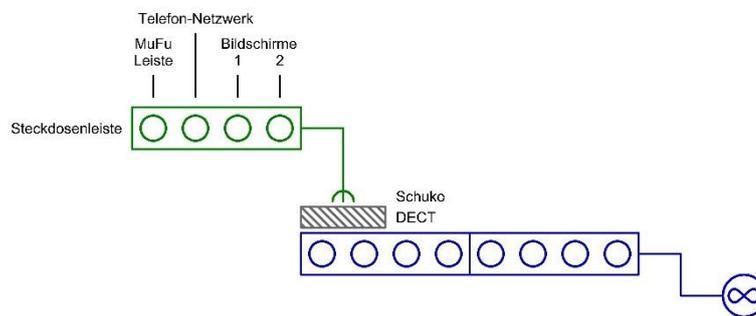


Abbildung 45: Strommonitoring, detailliertes Konzept für eine Arbeitsinsel

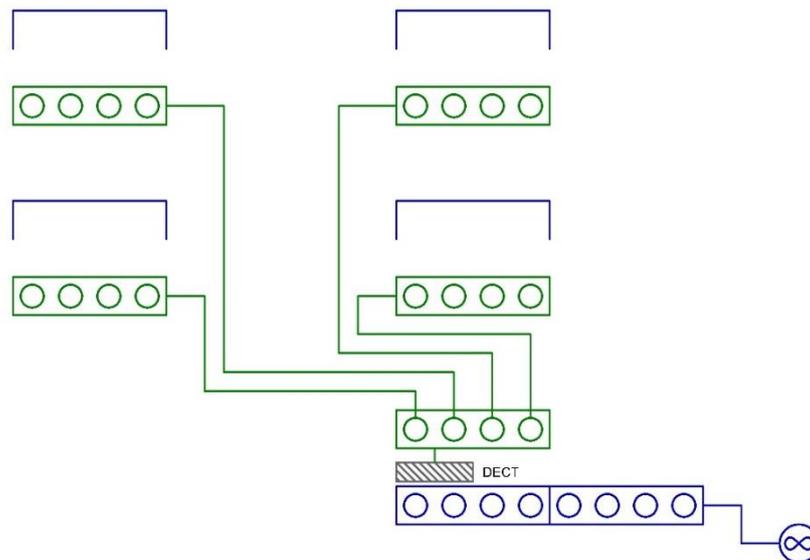
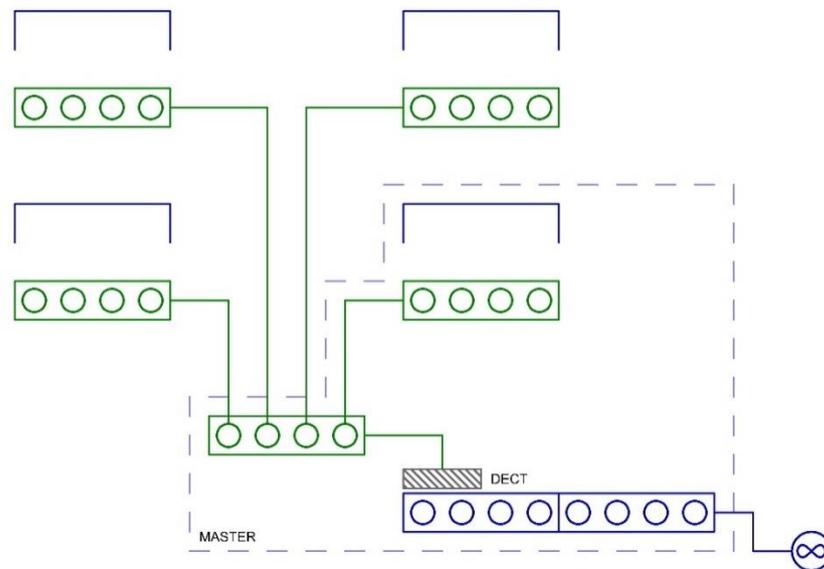
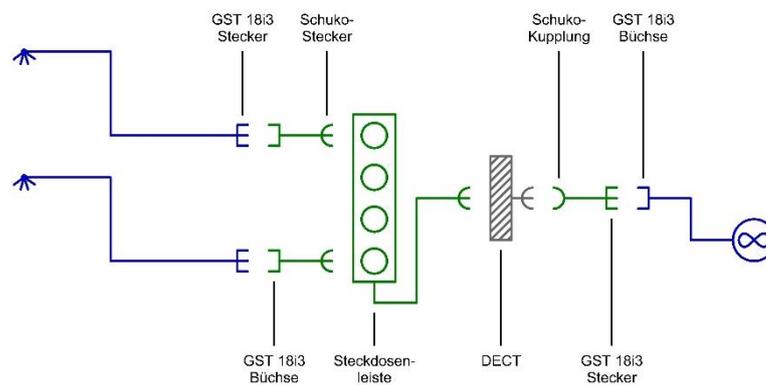


Abbildung 46: Strommonitoring, aggregiertes Konzept für 4 Arbeitsplätze



**Abbildung 47: Strommonitoring, aggregiertes Konzept**



**Abbildung 48: Strommonitoring-Konzept – Licht am Arbeitsplatz**

Es wurden Strommessgeräte an 6 Einzelarbeitsplätze und an 5 Vierer-Arbeitsplätzen installiert. Die Lage der Strommessgeräte und Router ist im Anhang Pläne und Tabelle 18 zu entnehmen.

**Tabelle 18: Strommessgeräte OG1 und OG2**

<b>1. OG</b>			
Messpunkt			
1	Strom, Bürogeräte	4er Arbeitsplatz	
2	Strom, Licht	4er Arbeitsplatz	
3	Strom, Bürogeräte	Einzelarbeitsplatz	
4	Strom, Bürogeräte	Einzelarbeitsplatz	Außer Betrieb (sendet seit 19.7.2019 nicht mehr)
5	Strom, Bürogeräte	Einzelarbeitsplatz	
6	Strom, Bürogeräte	Einzelarbeitsplatz	Außer Betrieb (sendet seit 21.11.2019 nicht mehr)
7	Strom, Licht	Einzelarbeitsplatz	Außer Betrieb (sendet seit 25.6.2019 nicht mehr)
8	Strom, Bürogeräte	Einzelarbeitsplatz	Außer Betrieb (sendet seit 12.11.2019 nicht mehr)
9	Strom, Bürogeräte	Einzelarbeitsplatz	Außer Betrieb (sendet seit 12.11.2019 nicht mehr)

<b>2. OG</b>			
Messpunkt			
1	Strom, Bürogeräte	4er Arbeitsplatz	
2	Strom, Licht	4er Arbeitsplatz	
3	Strom, Bürogeräte	4er Arbeitsplatz	
4	Strom, Bürogeräte	4er Arbeitsplatz	
5	Strom, Bürogeräte	4er Arbeitsplatz	
6	Strom, Bürogeräte	4er Arbeitsplatz	
7	Strom, Licht	4er Arbeitsplatz	
8	Strom, Bürogeräte	4er Arbeitsplatz	

Die Daten wurden ab dem 23. Mai 2019 erfasst. An fünf Messstellen ist allerdings die Datenübermittlung aus unbekanntem Gründen nach 1 bis 6 Monate unterbrochen worden (siehe Tabelle 18).

Aufgrund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Home-Office Situation können die Daten nur bis März 2020 als repräsentativ betrachtet werden.

### **5.1.2 Abgleich Messdaten**

Die Gebäudeleittechnik (GLT) nimmt unter anderem wichtige Parameter zur Bewertung des Innenraumklimas an verschiedenen Stellen des Gebäudes auf. Die Messstellen sind in den Plänen mit gelben Punkten dargestellt (siehe Anhang Pläne). Parallel dazu wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens an 12 Stellen des Gebäudes IC-Meter installiert, die das Innenraumklima (Temperatur, relative Luftfeuchte und CO<sub>2</sub>-Gehalt) aufnehmen (siehe 5.1.1). Die IC-Meter sind mit hellblauen Markierungen in den Plänen dargestellt (siehe Anhang Pläne).

Im Rahmen der Auswertung sollen zunächst die Daten der GLT mit den Daten der IC-Meter verglichen werden. Es wurden GLT-Messstellen und IC-Meter-Messstellen mit naheliegenden Positionen verglichen. Analysiert wurden die Innentemperatur, die Luftfeuchte und die CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die Auswertung beruht auf Stundenwerte für den Zeitraum von 18.09.2020 bis 19.11.2020.

#### **Raumlufttemperatur**

Abbildung 50, Abbildung 51, sowie Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen den Vergleich der Raumlufttemperatur im Besprecher in der Nord-West Ecke und im Open Space Bereich im 2.OG Süd West. Die Daten zeigen keine gute Übereinstimmung. Der Datenvergleich zeigt auf, dass die Daten der GLT über längere Zeiträume konstant bleiben. Es ist davon auszugehen, dass die verbauten Funksensoren nur ab einer bestimmten Änderung der Messgröße die Daten weiterleiten, die daraus resultierende Stufenform der Kurve ist gut zu erkennen. Darüber hinaus ist es wahrscheinlich, dass die Datenübertragung nicht durchgängig funktionierte.

Aufgrund der Datenlage werden die GLT Daten nicht für eine Bewertung des Innenraumkomforts herangezogen. Eine Rekalibrierung der Funksensoren und Vereinfachung der Steuerung im Open Space Bereich wurde in diesem Zuge angeregt.

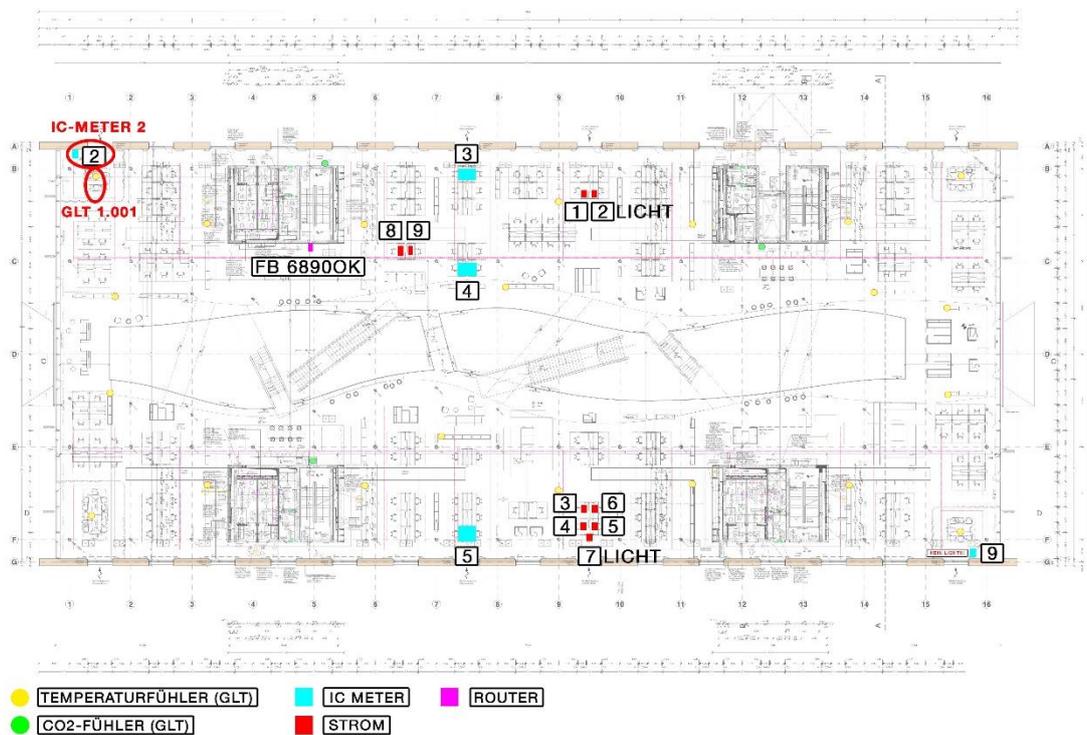


Abbildung 49: Lage IC-Meter 2 und GLT 1.001, Fassadenbereich, 1. OG

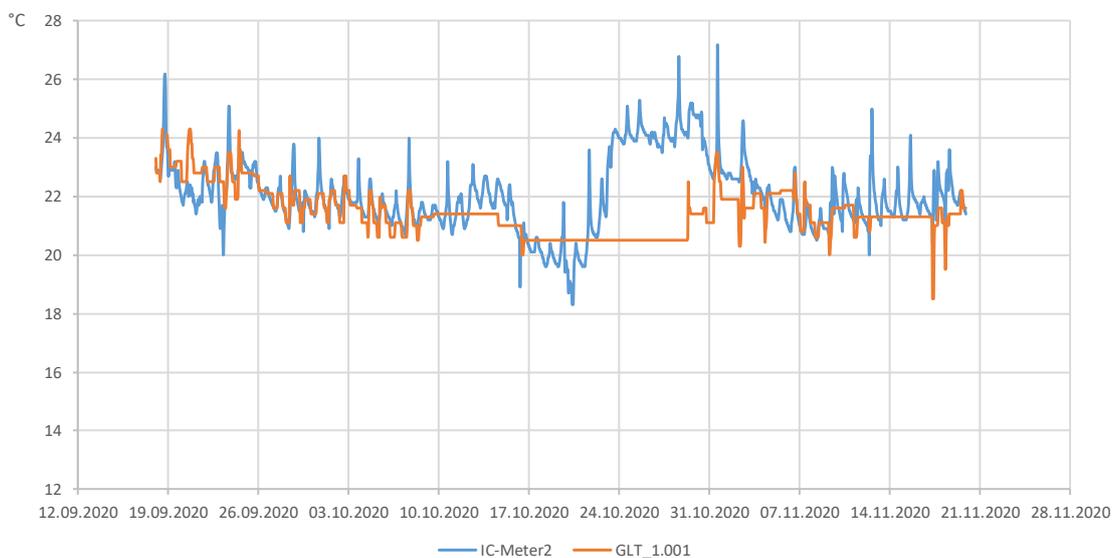


Abbildung 50: Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 1.001 – IC-Meter 2 (Fassadenbereich, 1. OG)

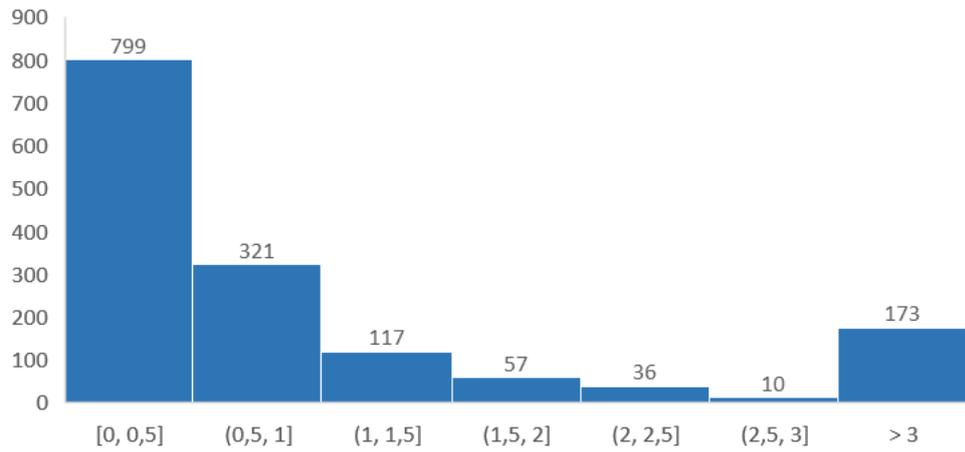


Abbildung 51: Raumlufttemperatur, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 1.001 und IC-Meter 2 (Fassadenbereich, 1. OG)

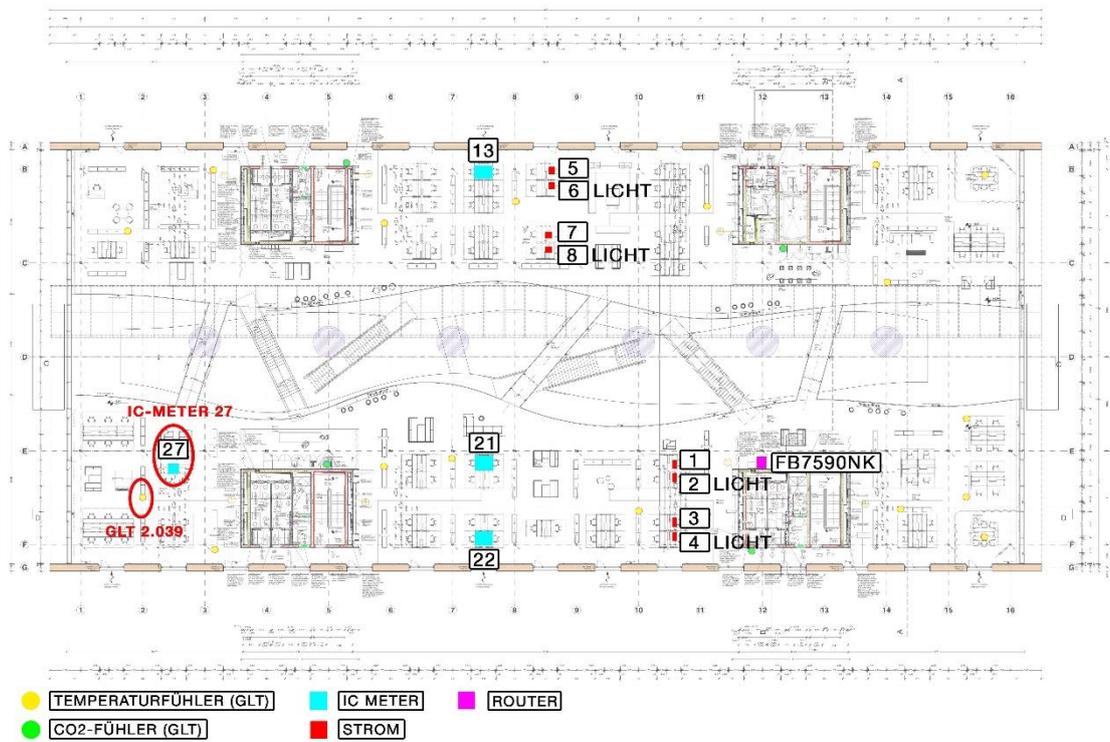
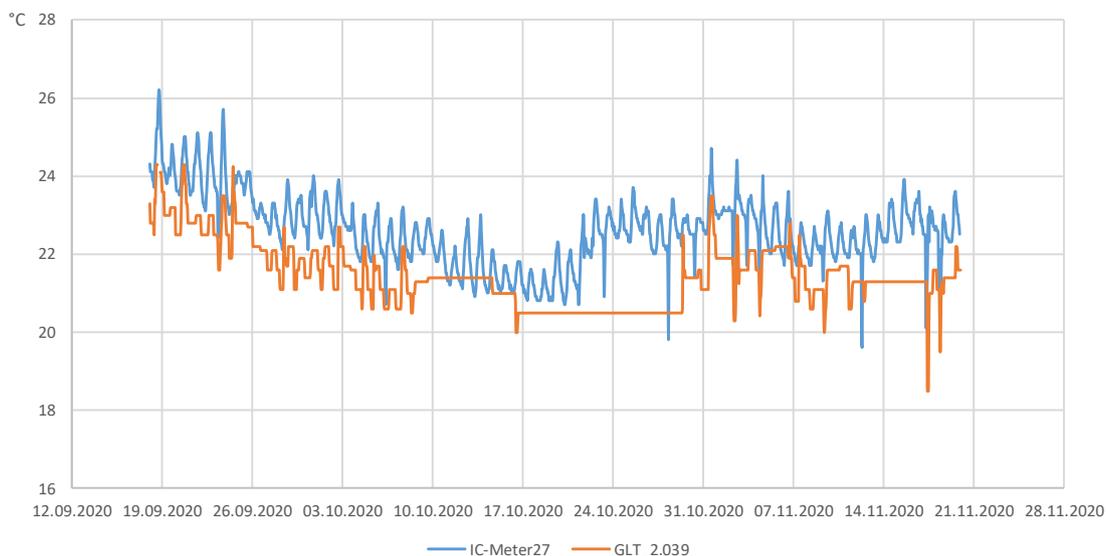
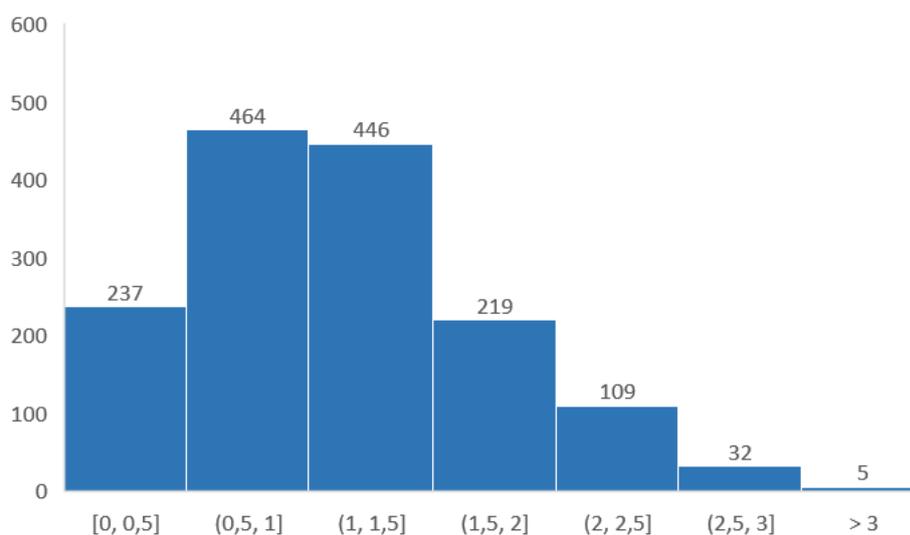


Abbildung 52: Lage IC-Meter 27 und GLT 2.039, Open-Space, 2. OG



**Abbildung 53: Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 2.039 – IC-meter 27 (Open-Space, 2. OG)**



**Abbildung 54: Raumlufttemperatur, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 2.039 und IC-Meter 27 (Open Space, 2. OG)**

## Luffeuchte

Abbildung 56 und Abbildung 59 zeigen den Vergleich der Raumluftfeuchte im mittleren Bereich des 1. und 2. Obergeschosses. Die Daten zeigen eine bessere Übereinstimmung als die Temperaturen, die Aufnahme der Feuchteänderung hätte eine ausreichend hohe Auflösung. Ein Offset zwischen den Daten ist zu erkennen, welcher auf die Differenz in der Temperaturmessung zurückgeführt werden kann.

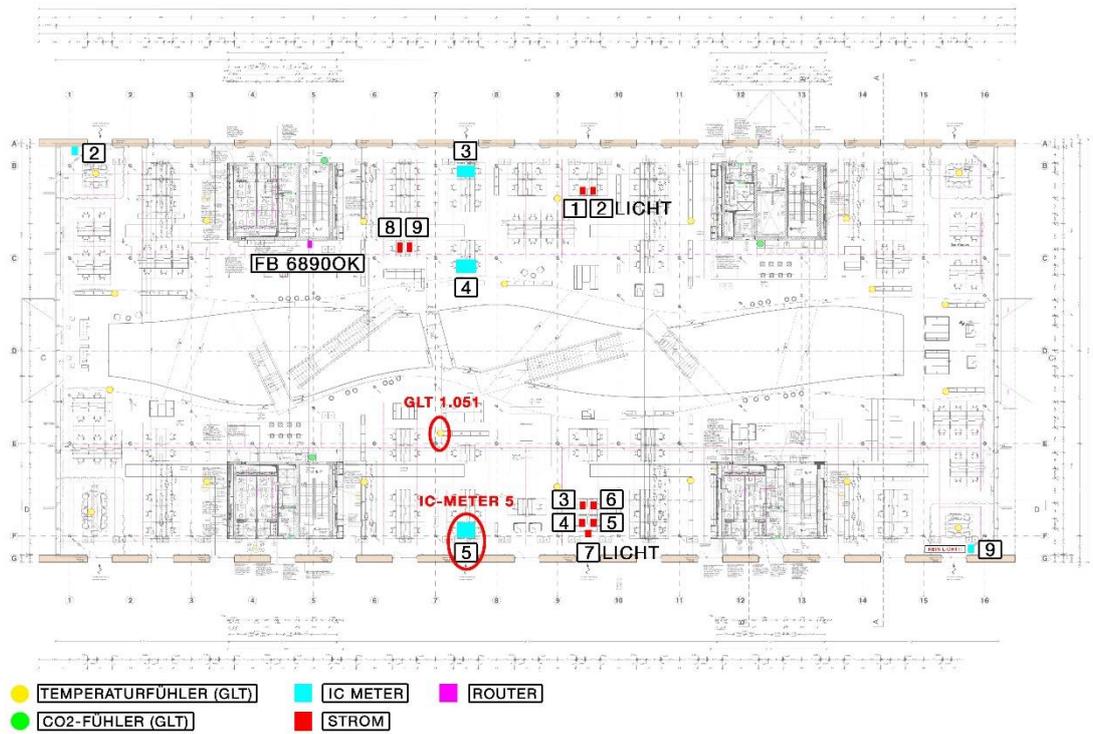


Abbildung 55: Lage IC-Meter 5 und GLT 1.051, Open-Space, 1. OG

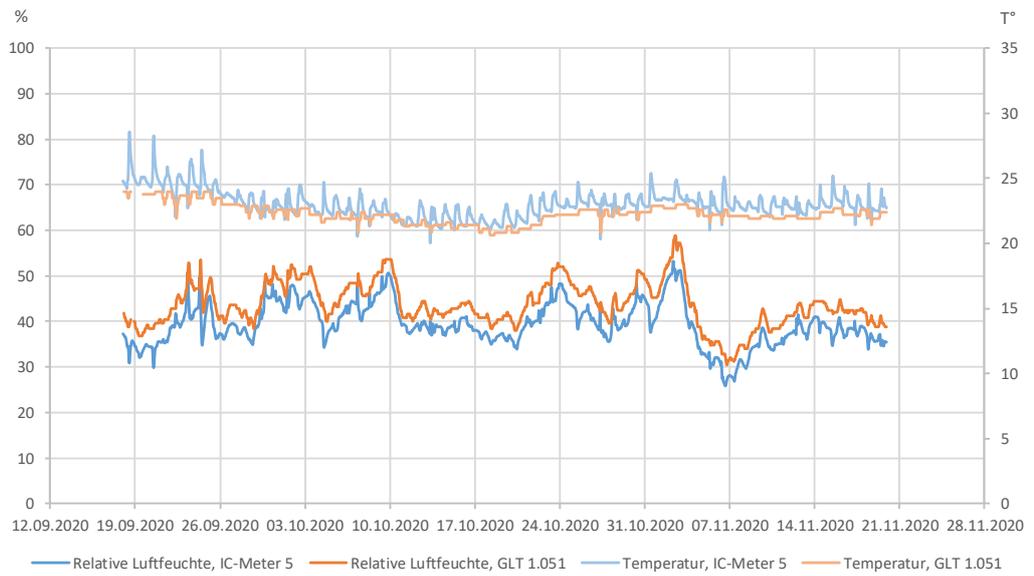


Abbildung 56: Relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 1.051 – IC-Meter 5, Open-Space 1.0G

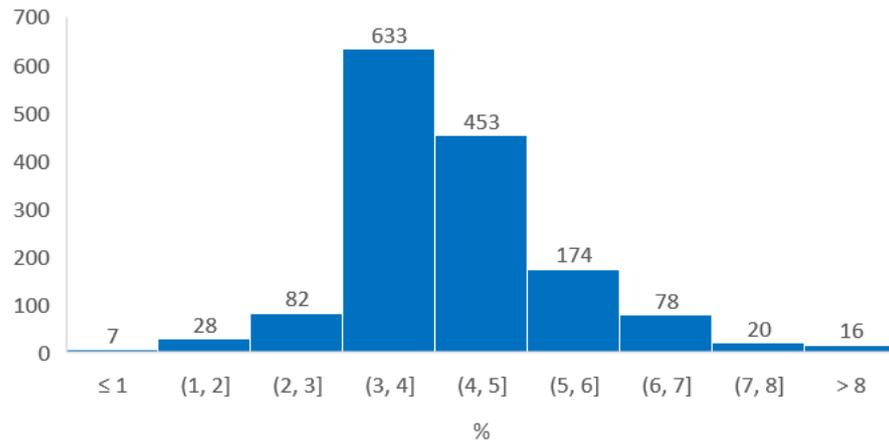


Abbildung 57: Relative Luftfeuchte, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 1.051 und IC-Meter 5, Open-Space 1.OG

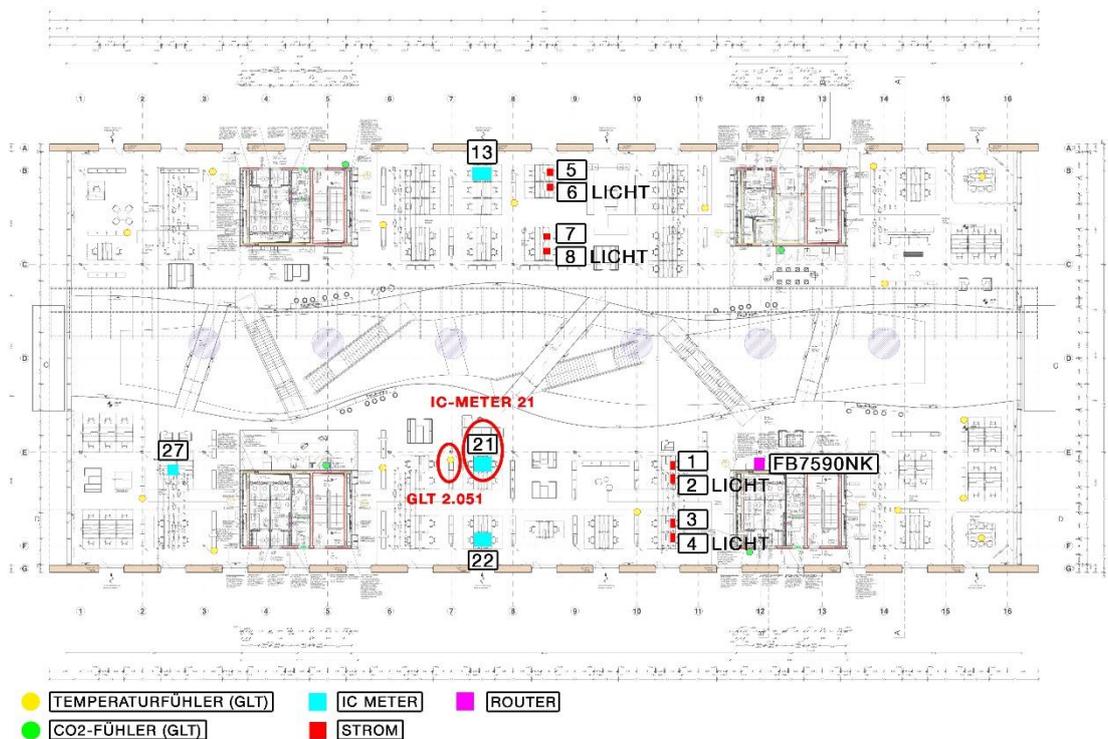
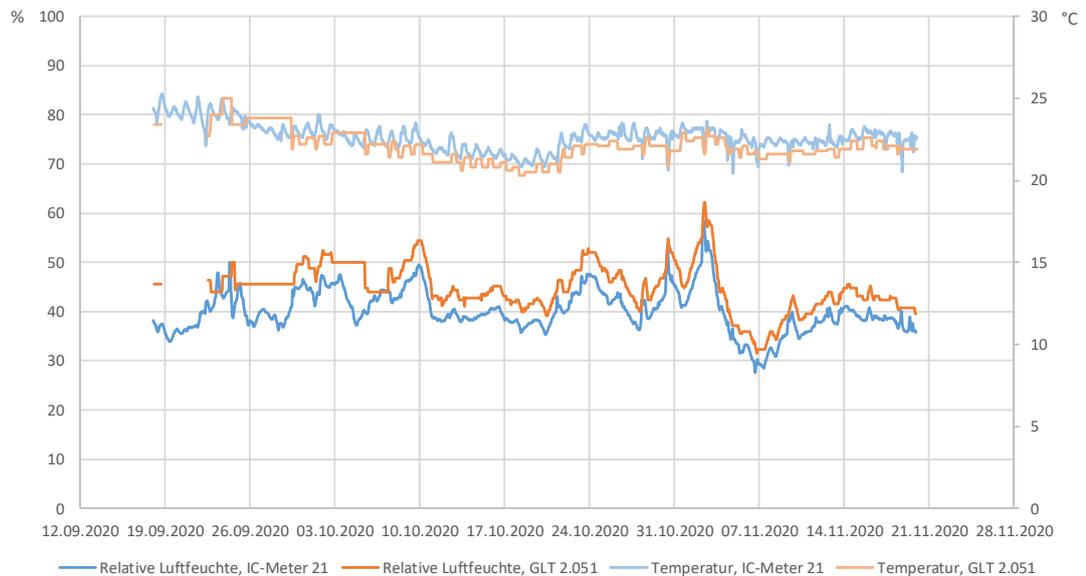
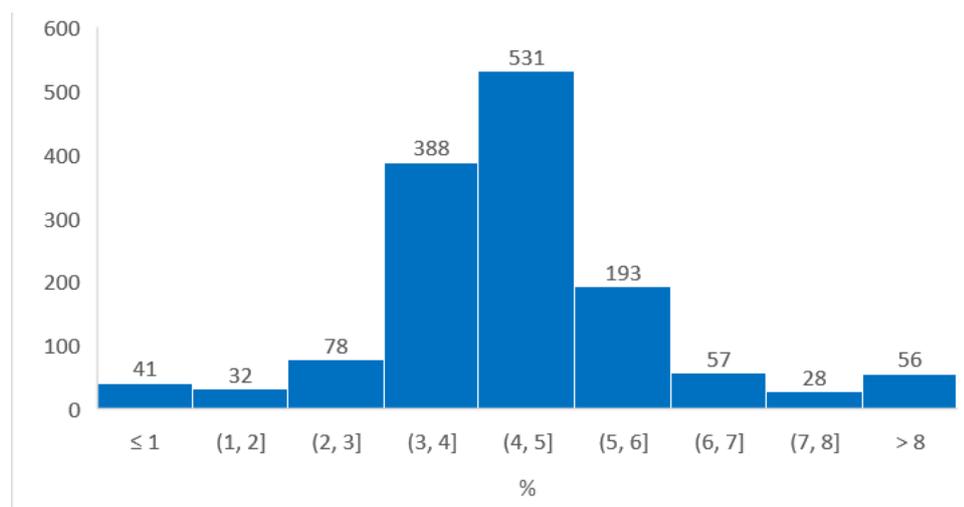


Abbildung 58: Lage IC-Meter 21 und GLT 2.051, Open-Space, 2. OG



**Abbildung 59: Relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur, Vergleich GLT 2.051 – IC-Meter 21, Open-Space 1.OG**



**Abbildung 60: Relative Luftfeuchte, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 2.051 und IC-Meter 21, Open-Space 1.OG**

## CO<sub>2</sub>-Gehalt

Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen den Vergleich der CO<sub>2</sub>-Konzentration im mittleren Bereich des 1. OG. Die Daten zeigen trotz der unterschiedlichen Entfernung zu den Arbeitsplätzen eine sehr gute Übereinstimmung. Daraus kann im ersten Schritt gefolgert werden, dass eine gleichmäßige Luftdurchmischung im Raum passiert.

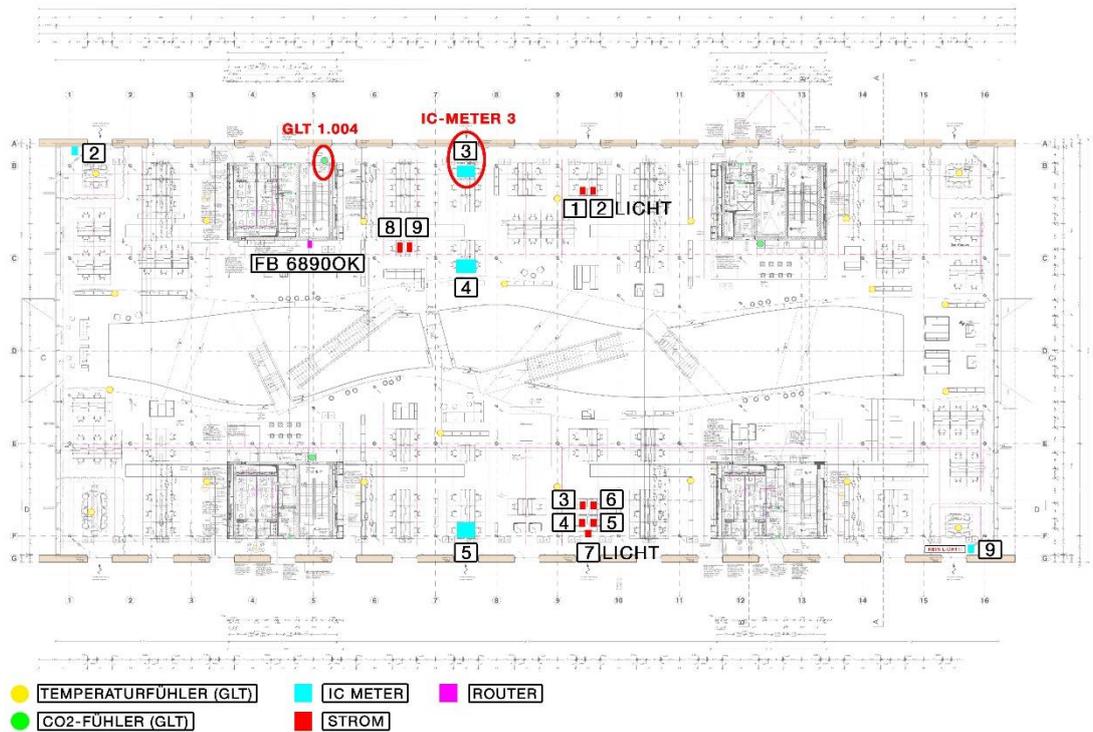


Abbildung 61: Lage IC-Meter 3 und GLT 1.004 Open-Space, 1. OG

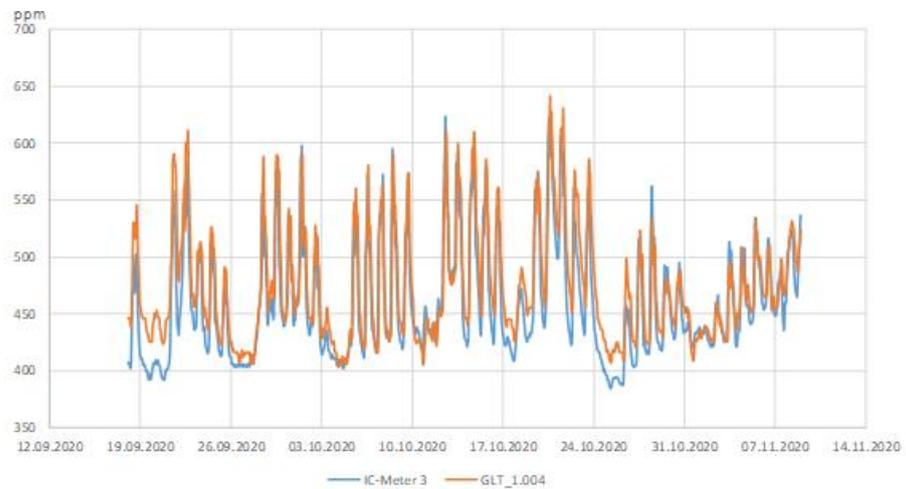


Abbildung 62: CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft, Vergleich GLT 1.004 – IC-Meter 3 (Open-Space, 1. OG)

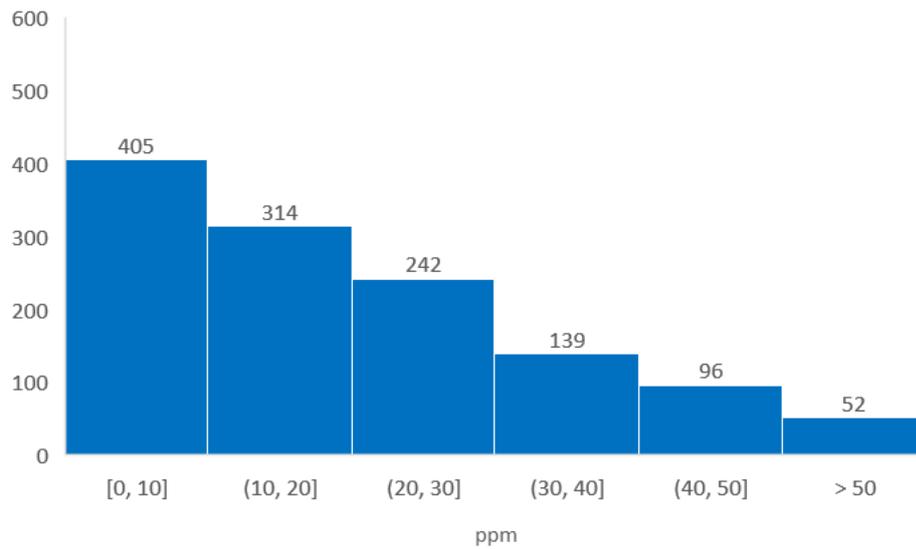


Abbildung 63: CO<sub>2</sub>-Gehalt, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 1.004 und IC-Meter 3, Open-Space, 1.OG

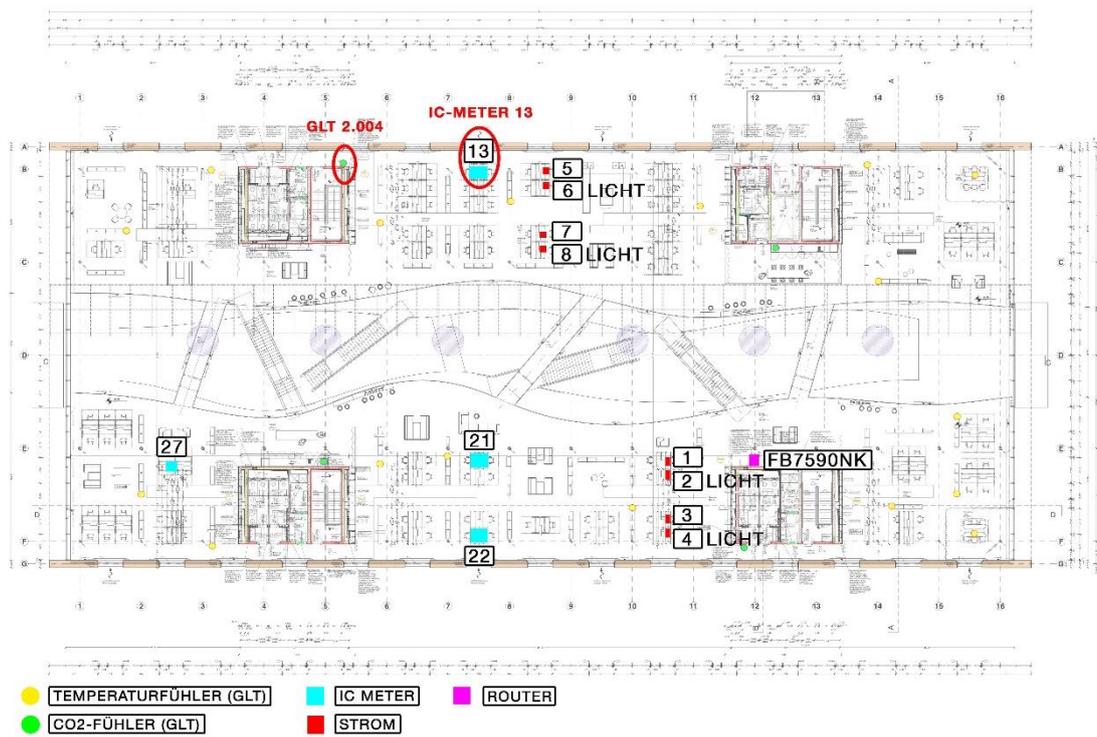
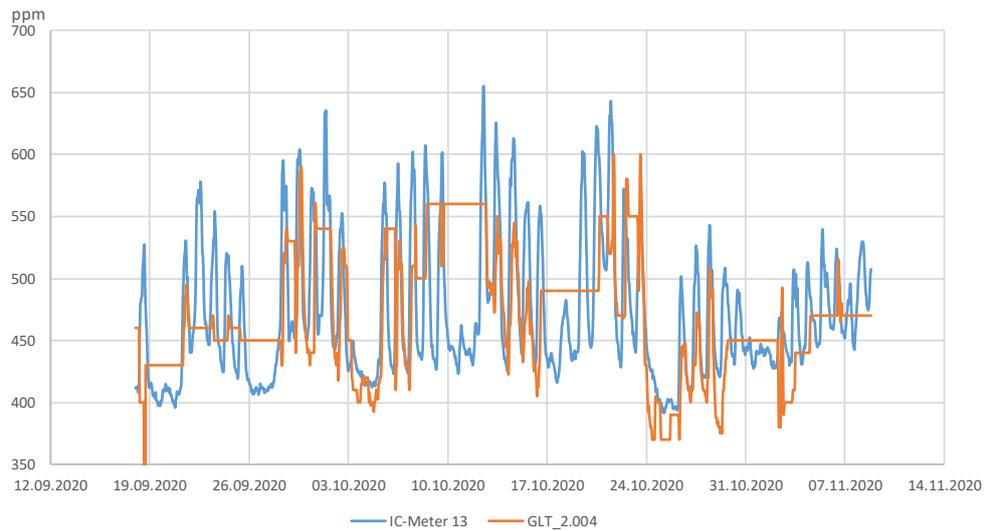
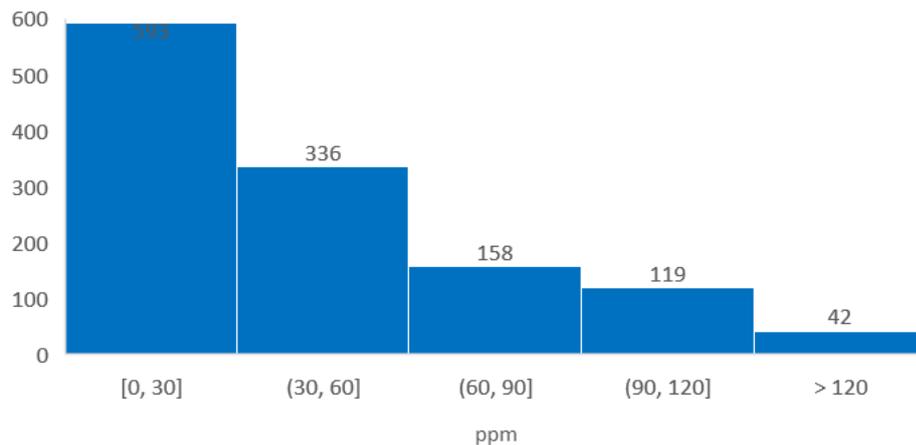


Abbildung 64: Lage IC-Meter 13 und GLT 2.004 Open-Space, 2. OG



**Abbildung 65: CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft, Vergleich GLT 2.004 – IC-Meter 13 (Open Space, 2. OG)**



**Abbildung 66: CO<sub>2</sub>-Gehalt, Häufigkeit der Differenz zwischen GLT 2.004 und IC-Meter 13, Open Space, 2.OG**

### Zusammenfassung

Die IC-Meter zeigen sich hier als sehr zuverlässige Datenquelle, bieten eine hohe Genauigkeit und hohe Messfrequenz (alle 5 Min, GLT 15 Min) und ermöglichen konsistentere Verwendung der Daten als die GLT-Daten

Die unbefriedigende Temperaturaufzeichnung der verbauten Sensoren der GLT führt dazu, dass der Luftzustand nicht ausreichend genau gemessen wird.

Aufgrund der Datenlage werden die GLT Daten nicht für eine Bewertung des Innenraumkomforts herangezogen. Eine Rekalibrierung der Funksensoren und Vereinfachung der Steuerung im Open Space Bereich wurde in diesem Zuge angeregt.

### 5.1.3

#### 5.1.3 Analyse des thermischen Komforts

Der thermische Komfort wurde an 12 verschiedenen Stellen mit den IC-Metern gemessen (siehe Kapitel 5.1.1). Für die Analyse des thermischen Komforts fiel die Entscheidung für die repräsentativen Messungen auf das erste Obergeschoss. Im Gegensatz zum Erdgeschoss, in dem Sondernutzungen und geschlossene Räume für Konferenzen etc. vorherrschen, ist im Obergeschoss die offene Struktur des Gebäudes sehr gut analysierbar. Die Messungen erfolgen hier nahe der West- und Ostfassade (IC-Meter 2 und 9, siehe Anhang Pläne). Aufgrund des solaren Eintrags lassen diese Bereiche die höchste Raumtemperatur erwarten. [angelehnt an [1]]

Analysiert wurden die Stundenwerte für die Temperatur, die absolute Luftfeuchte und die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft in verschiedenen Darstellungen. Es wurden der Sommer 2019 (22.7 – 27.10.2019) und der Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 27.01.2020) ausgewertet.

Folgende Grafiken wurden dargestellt:

- zeitlicher Ablauf der Raumluffttemperatur und der Außentemperatur
- zeitlicher Ablauf der absoluten Luftfeuchte (innen und außen)
- h,x-Diagramm (Absolute Luftfeuchte in Abhängigkeit der Raumluffttemperatur, Komfortbereich nach DIN 1946-6 [18])
- Raumluffttemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur (Behaglichkeitsbereich nach DIN EN 15251 [19])
- CO<sub>2</sub>-Konzentration in Abhängigkeit der Außentemperatur (Kategorien nach DIN EN 13779 [20])

Die Grafiken wurden jeweils für die komplette Zeit (00:00 – 24:00, alle Wochentage) und nur für die Zeiten mit Belegung (angenommen Montag bis Freitag von 8 bis 18 Uhr) dargestellt.

### 5.1.3.1 Thermischer Komfort im Sommer

IC-Meter 9: OG1-F16  
IC-Meter 2: OG1-A1  
Außen

#### Temperatur [°C]

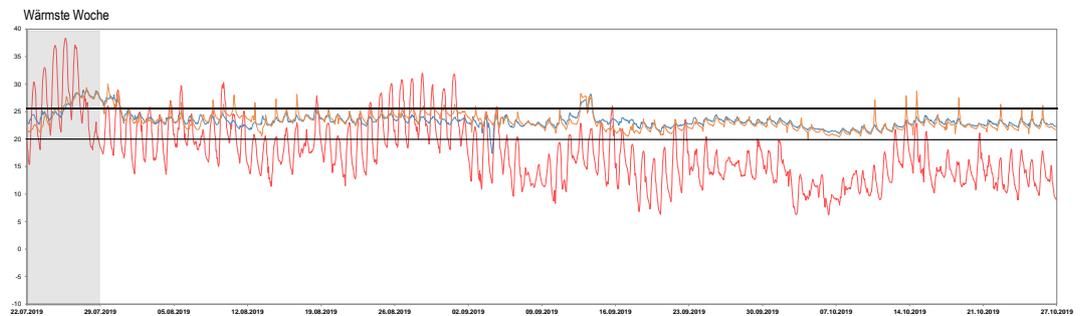


Abbildung 67: Temperatur [°C] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00)

#### Absolute Luftfeuchte [g/kg]



Abbildung 68: Absolute Luftfeuchte [g/kg] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00)

## h,x-Diagramm

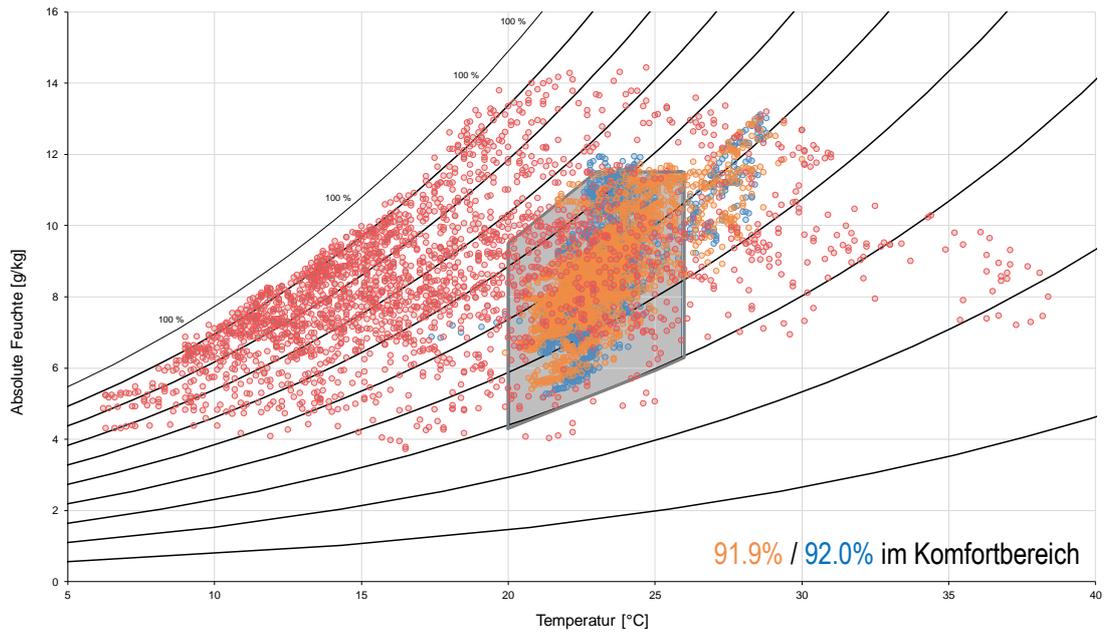


Abbildung 69: h,x-Diagramm - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00); Komfortbereich (grau) nach DIN 1946-6 [18]

## h,x-Diagramm (Belegungszeit)

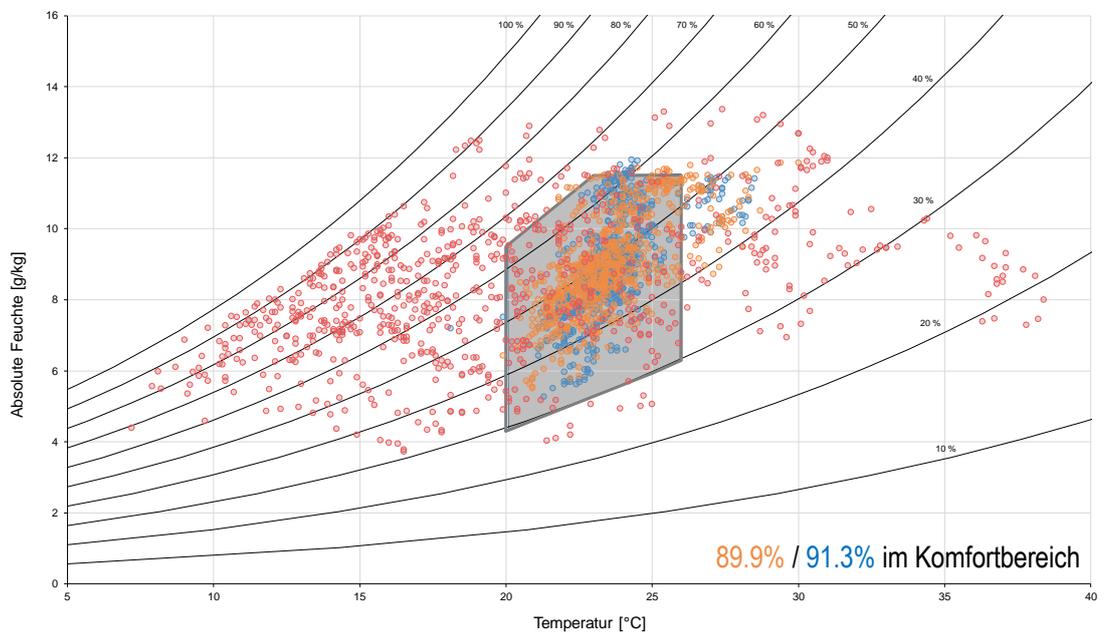


Abbildung 70: h,x-Diagramm - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, Belegungszeit); Komfortbereich (grau) nach DIN 1946-6 [18]

## Lufttemperatur [°C]

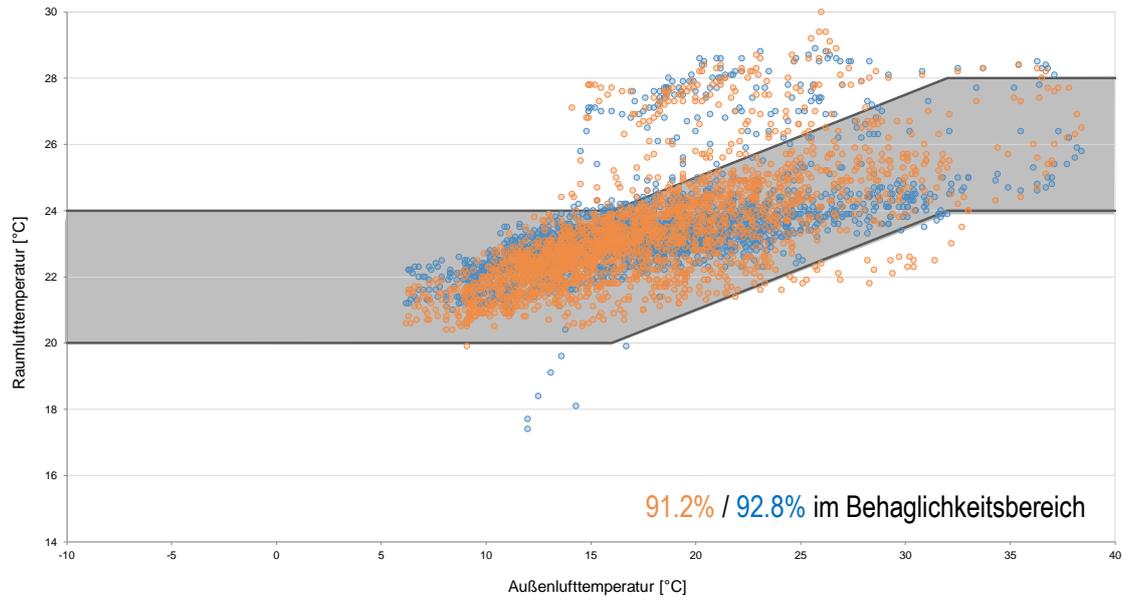


Abbildung 71: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00); Behaglichkeitsbereich (grau) nach DIN EN 15251 [19]

## Lufttemperatur [°C] (Belegungszeit)

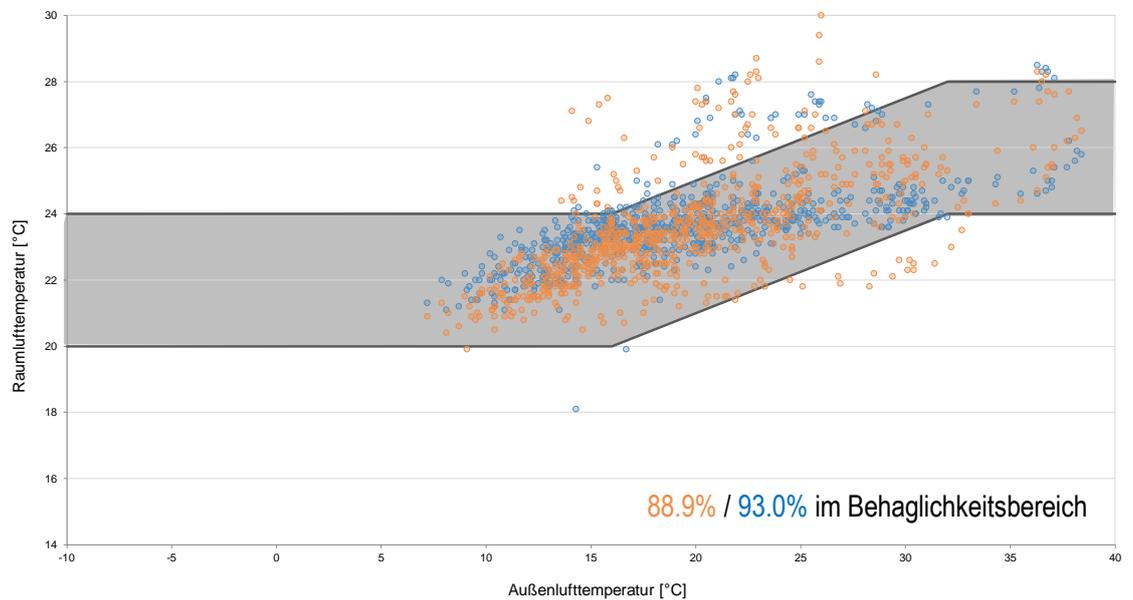


Abbildung 72: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) – Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019) (Belegungszeit); Behaglichkeitsbereich (grau) nach DIN EN 15251 [19]

## CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm]

Tabelle 19: Kategorien der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft nach DIN EN 13779 [20]

Kategorie	Absolute CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Innenraumluft [ppm]
IDA 1	≤ 800
IDA 2	800 – 1000
IDA 3	1000 – 1400
IDA 4	> 1400

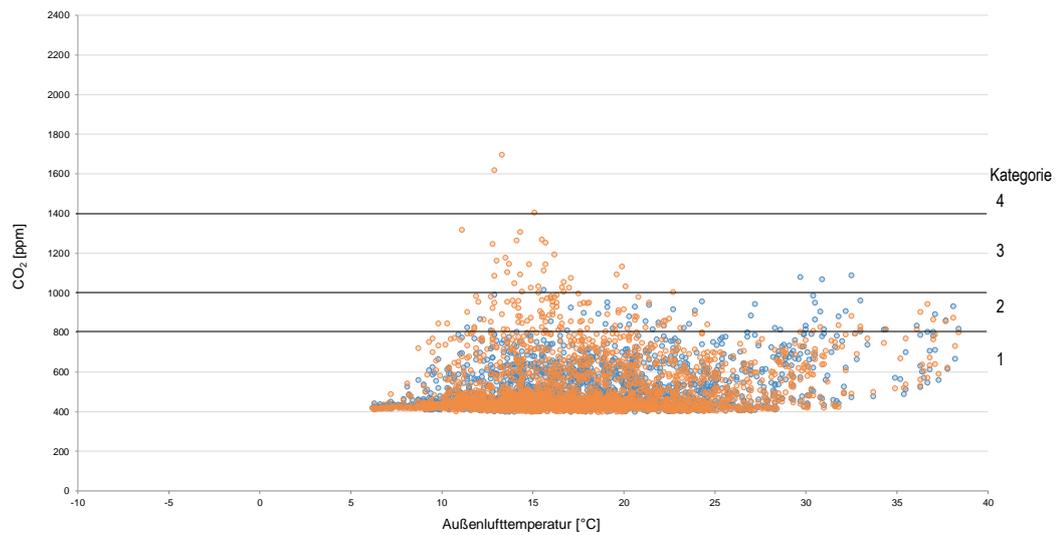


Abbildung 73: CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, 00:00 – 24:00)

## CO<sub>2</sub>-Konzentration (Belegungszeit) [ppm]

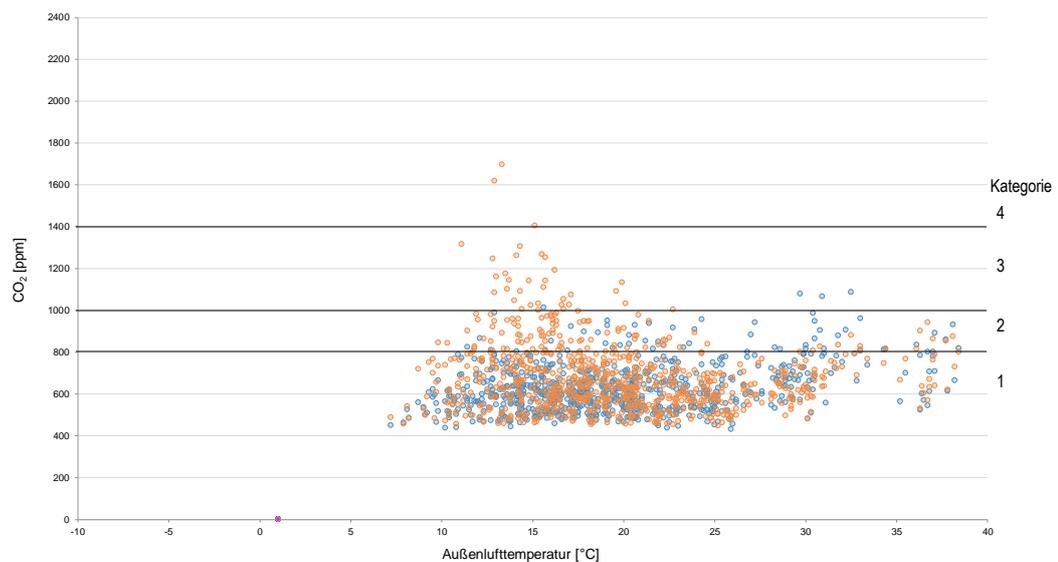


Abbildung 74: CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] - Sommer 2019 (22.7.2019 – 27.10.2019, Belegungszeit)

Das h,x-Diagramm zeigt die stündlichen Messungen während der Arbeitszeit. In der heißesten Sommerwoche des Jahres lässt sich beobachten, dass nur ein sehr geringer Teil der Datenpunkte außerhalb der Komfortzone nach DIN 1946-6 liegt. Es gibt starke Extrema an kalten Tagen zu verzeichnen, die sich nur durch Messfehler, z.B. direkte Sonneneinstrahlung erklären lassen. Die Raumlufffeuchte hingegen ist sehr konstant.

Das Temperaturdiagramm zeigt im Bezug zur Außentemperatur Werte im Komfortbereich nach DIN EN 15251. Die Außenlufttemperatur liegt im Messzeitraum teils weit über 35 °C. Es zeigt sich, dass der Effekt der Nachtauskühlung in dem von uns betrachteten Zeitraum nicht sichtbar ist. Der Temperaturverlauf der Sommerwoche macht deutlich, dass die Option der Nachtauskühlung in der ersten Sommerperiode nicht wie geplant betrieben wurde. Die Innenraumtemperaturen überschreiten nachts die Außenlufttemperaturen und bleiben konstant, obwohl letztere sinken. Hier gibt es noch Potenzial, um die thermische Behaglichkeit für die Nutzerinnen und Nutzer weiter zu verbessern.

Das Diagramm in Abbildung 68 zeigt anschaulich, dass der Feuchtegehalt der Luft im Innenraum während relativ trockener Witterungsperioden im gewünschten Bereich bleibt. Wie groß der Anteil der mechanischen Lüftung während der sommerliche Entfeuchtung ist, lässt sich nicht separat ermitteln.

Abbildung 73 und Abbildung 74 zeigen eine hohe Luftqualität im Sommer. In der Belegungszeit liegen 95,7 % der Werte in den Kategorien 1 oder 2 (unter 1000 ppm) nach DIN EN 13779.

### 5.1.3.2 Thermischer Komfort im Winter

IC-Meter 9: OG1-F16  
IC-Meter 2: OG1-A1  
Außen

#### Temperatur [°C]

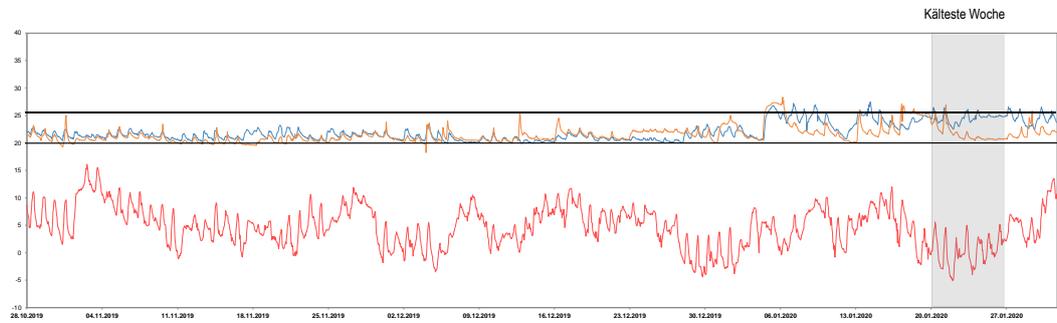


Abbildung 75: Temperatur [°C] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00)

#### Absolute Luftfeuchte [g/kg]



Abbildung 76: Absolute Luftfeuchte [g/kg] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00)

## h,x-Diagramm

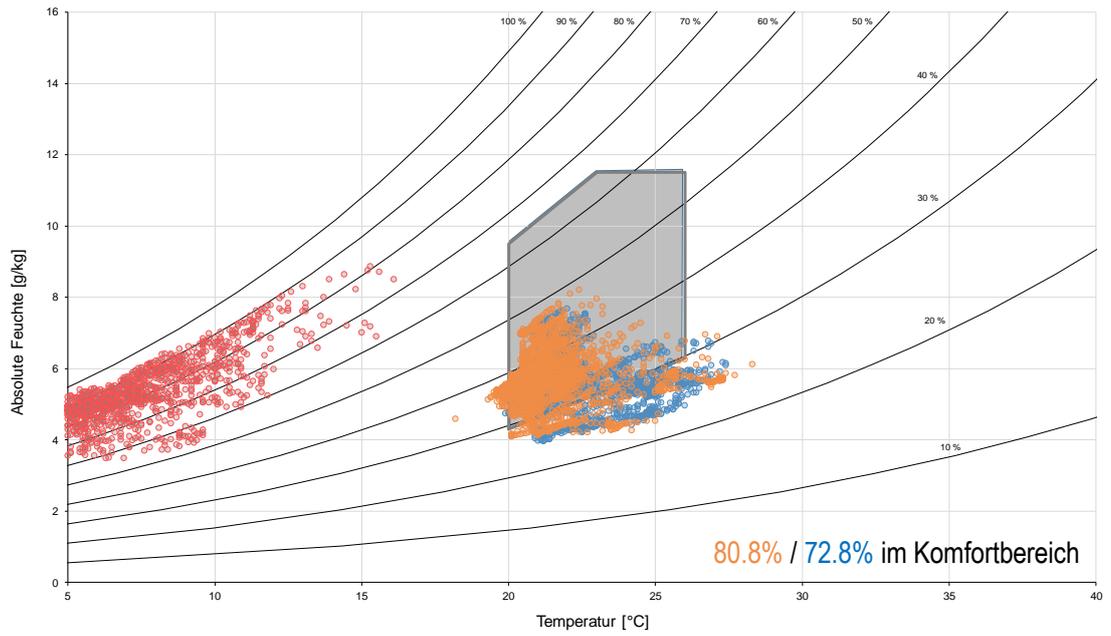


Abbildung 77: h,x-Diagramm- Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00)

## h,x-Diagramm (Belegungszeit)

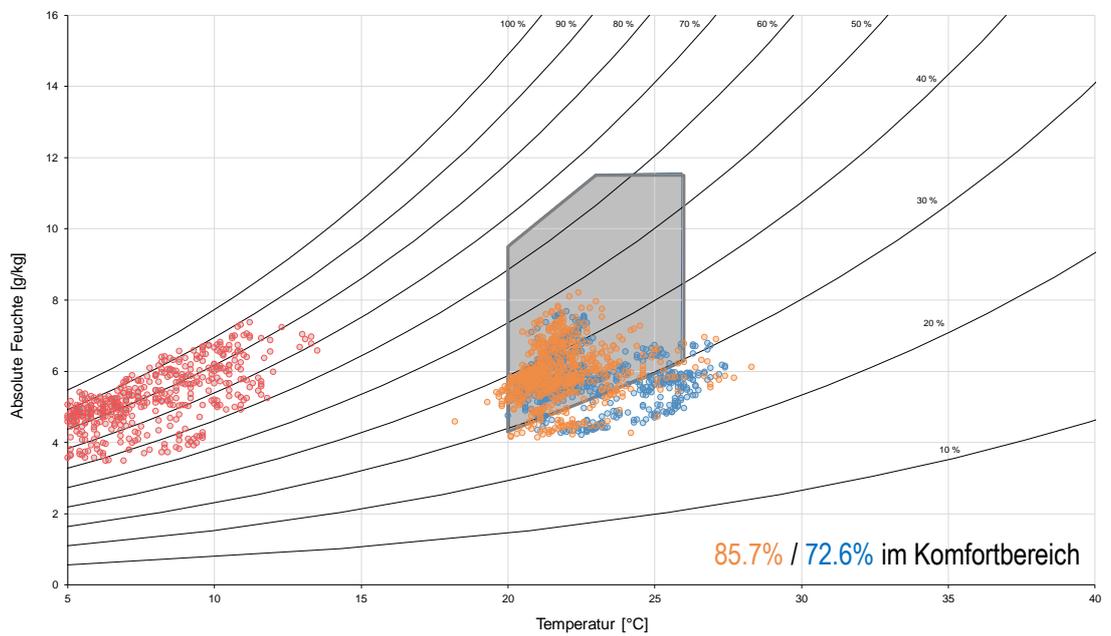


Abbildung 78: h,x-Diagramm- Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, Belegungszeit)

## Lufttemperatur [°C]

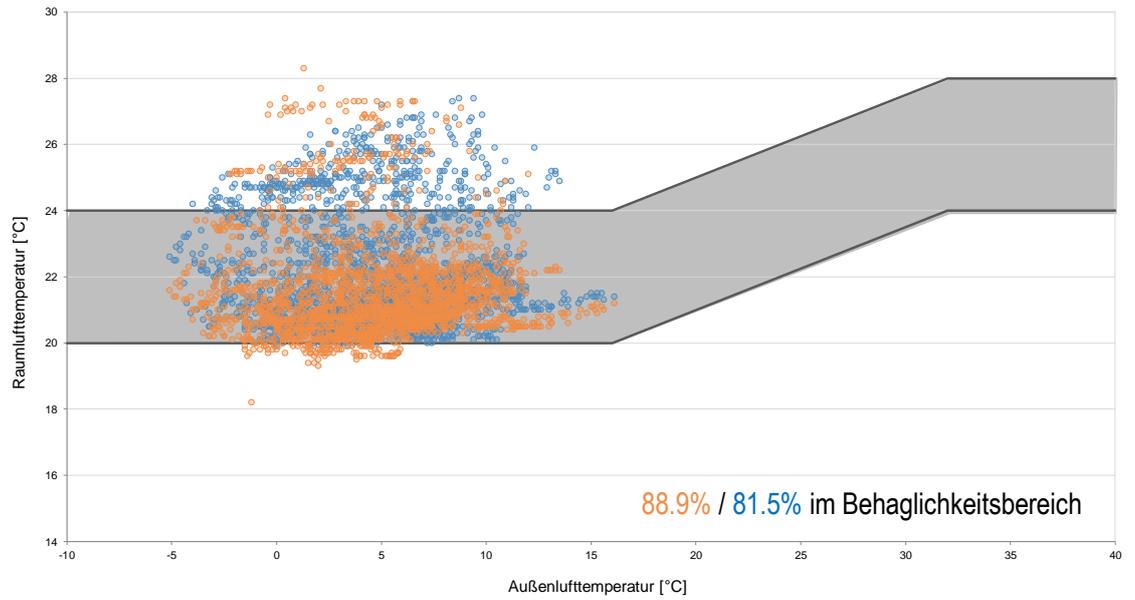


Abbildung 79: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) – Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00)

## Lufttemperatur [°C] (Belegungszeit)

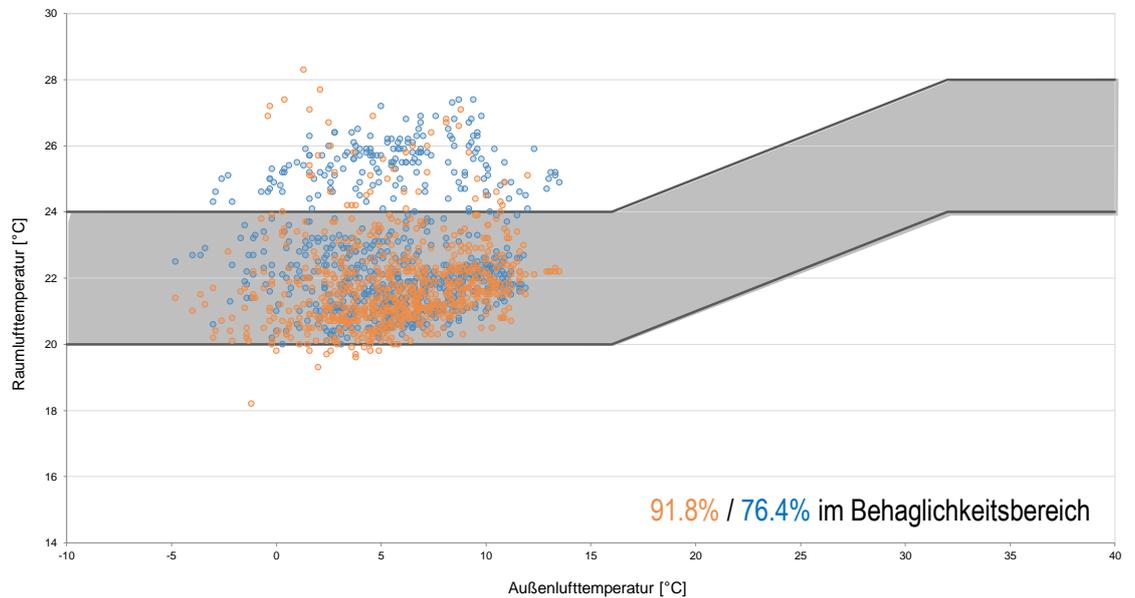


Abbildung 80: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) – Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, Belegungszeit)

## CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm]

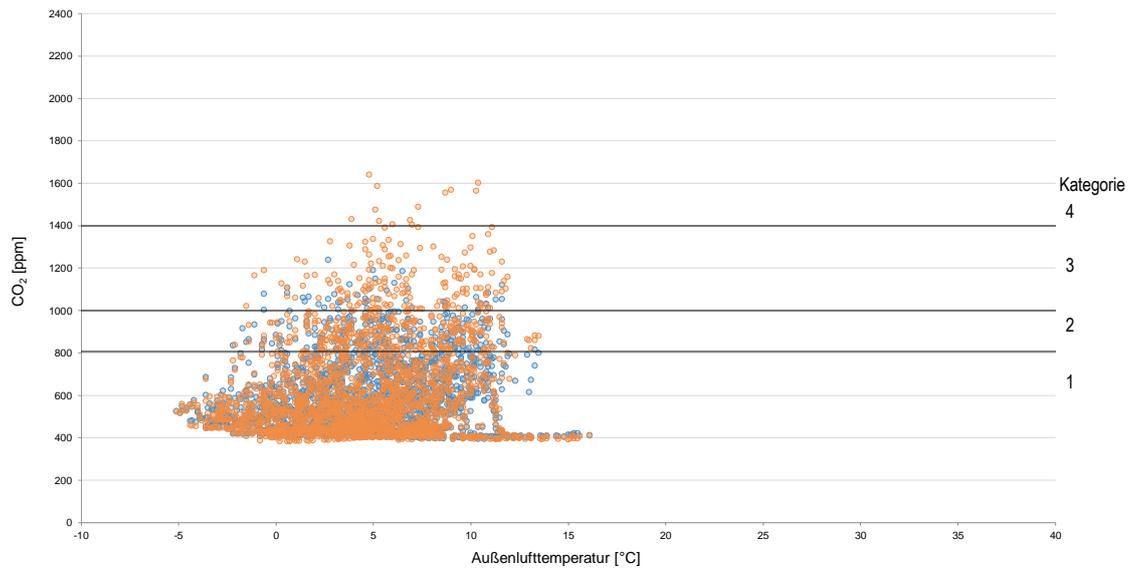


Abbildung 81: CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, 00:00 – 24:00)

## CO<sub>2</sub>-Konzentration (Belegungszeit) [ppm]

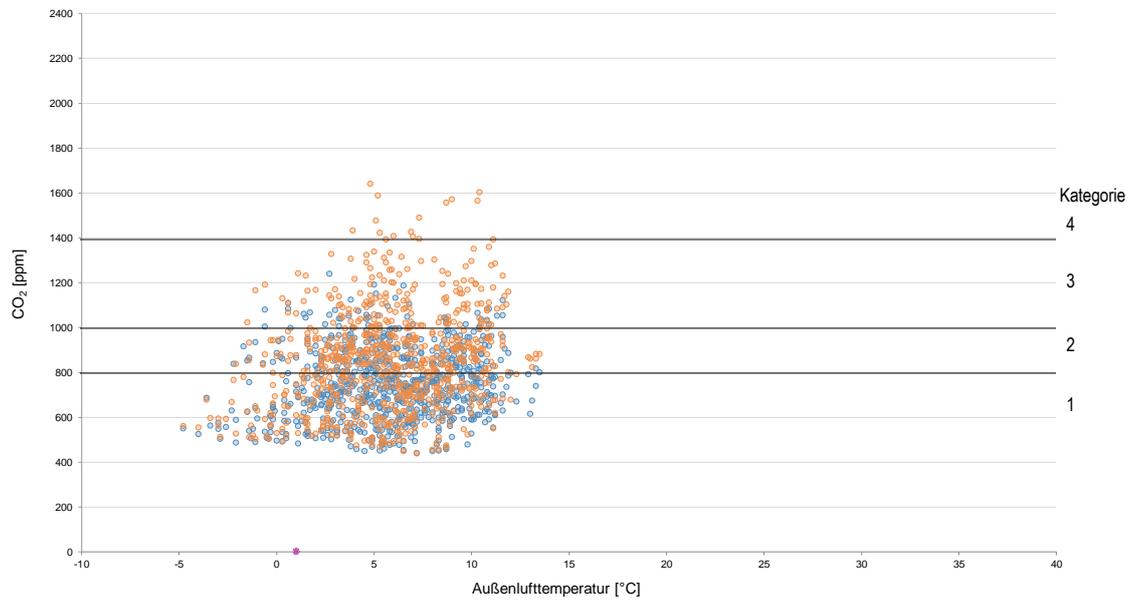


Abbildung 82: CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] - Winter 2019-2020 (28.10.2019 – 31.01.2020, Belegungszeit)

Im Winter kommt es in dem untersuchten Innenraum teilweise zu Maximalwerten über 26 °C bei einer Außenlufttemperatur um den Gefrierpunkt. Dies lässt sich auf die kurzzeitigen starken solaren Erträge mittels der Fassade zurückführen. Insgesamt ist die

winterliche Raumtemperatur tendenziell hoch. Die erhöhten Raumtemperaturen im Winter sollten mit einer Optimierung der Heizungsregelung vermieden werden können.

Das Diagramm in Abbildung 76 veranschaulicht hier auch wie der Feuchtegehalt der Luft im Innenraum während relativ feuchten Witterungsperioden im Komfortband erhalten bleibt. Mit einer winterlichen Raumtemperatur von 20 °C könnte eine relative Feuchte von unter 30 Prozent vermieden werden.

Der Vergleich der Diagramme zur CO<sub>2</sub>-Konzentration im Winter (Abbildung 81 und Abbildung 82) und im Sommer (Abbildung 73 und Abbildung 74) zeigt eindeutig, dass die Menschen im Inneren des Gebäudes weitestgehend auf die gewünschte natürliche Fensterlüftung verzichten, sobald die Außenlufttemperaturen 15 °C unterschreiten. Dennoch ist die Luftqualität im Winter immer noch sehr gut. Während der Belegungszeit liegen 77,4 % der Werte in Kategorie 1 oder 2 (unter 1000 ppm) nach DIN EN 13779.

### 5.1.3.3 Ausblick

Die Messergebnisse wurden hier für die zwei ausgewählten Messpunkte mit dem höchsten Überhitzungspotential für den Sommer 2019 und für den Winter 2019-2020 dargestellt. Im Anschluss wurden die Messungen für das folgende Jahr weitergeführt. Die Analyse der Messergebnisse für den Sommer 2020 zeigt zwar mehr Messpunkte außerhalb des Komfortbereichs im h,x- sowie im Temperaturdiagramm (siehe Abbildung 84 und Abbildung 85), kann allerdings aufgrund der pandemiebedingten geringen Gebäudebelegung, einem Ausfall des Kühlsystems sowie des besonders heißen Sommers (siehe Abbildung 83) nicht als repräsentativ dargestellt werden.

Das Gebäude bietet aufgrund der Vorzüge der verwendeten Materialien und der gegebenen Baustruktur Potential für weitere Anpassungen und Justierungen bezüglich des thermischen Komforts.

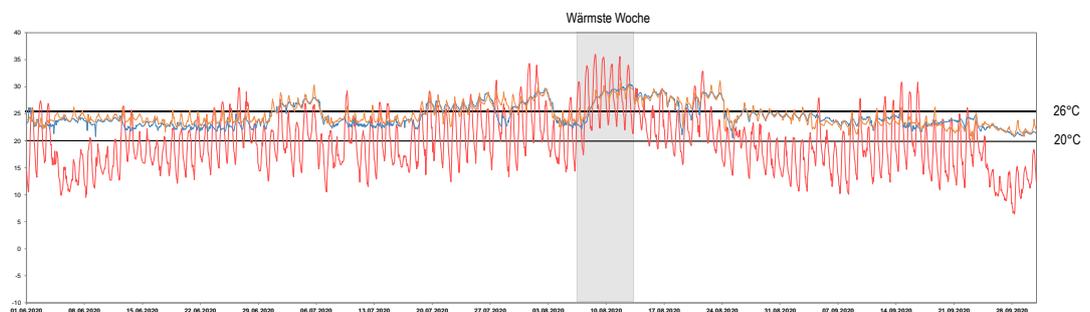
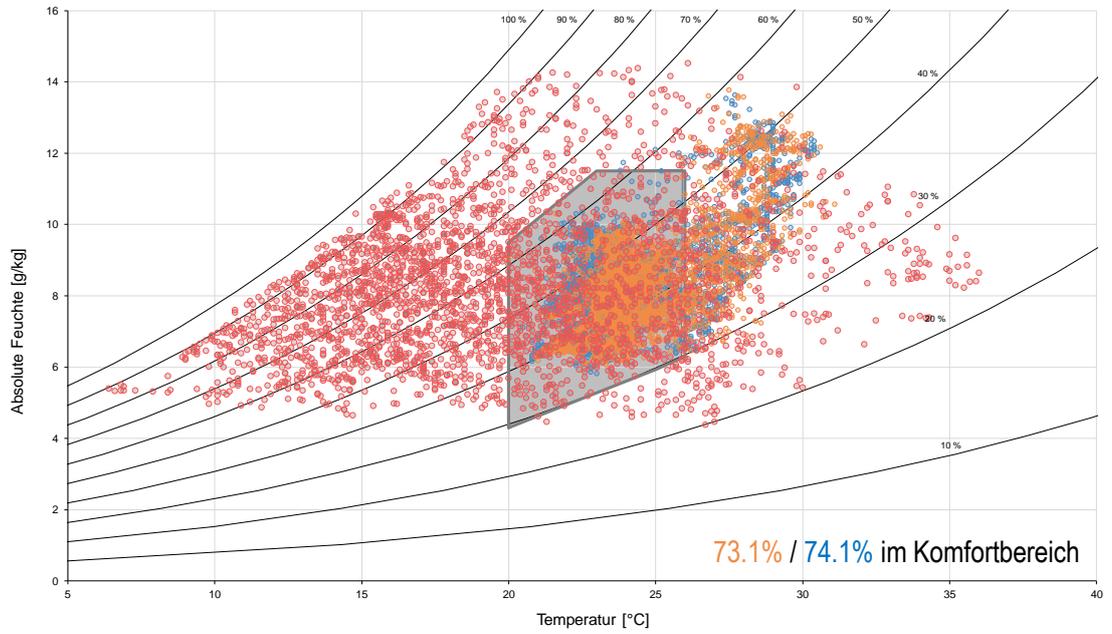
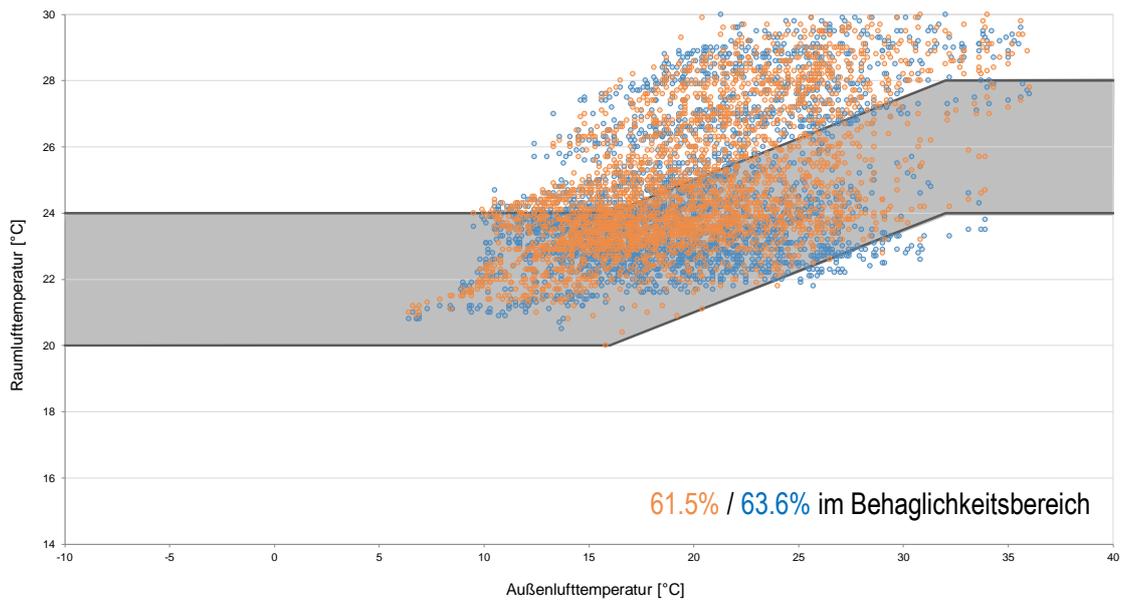


Abbildung 83: Temperatur [°C] - Sommer 2020 (1.6.2020 – 30.9.2020, 00:00 – 24:00)



**Abbildung 84: h,x-Diagramm - Sommer 2020 (1.6.2020 – 30.9.2020, 00:00 – 24:00)**



**Abbildung 85: Lufttemperatur (Innentemperatur im Verhältnis zu Außentemperatur) –Sommer 2020 (1.6.2020 – 30.9.2020, 00:00 – 24:00)**

#### 5.1.4 Analyse des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung

Für die Analyse des Stromverbrauchs wird auf Messdaten des Gebäudehauptzählers sowie die Stromerzeugungsdaten aus der Photovoltaik-Anlage inkl. NetZRückspeisung (im 15 Minuten-Takt, seit Dezember 2018) zurückgegriffen. Weiterhin werden die Strommessdaten an ausgewählten Arbeitsplätzen (siehe Kapitel 5.1.1) herangezogen (im 15 Minuten-Takt, seit 23. Mai 2019).

##### 5.1.4.1 Stromverbrauch und -erzeugung – Jahresbilanz

Der Stromverbrauch des gesamten Gebäudes sowie die Stromerzeugung der PV-Anlage sind in Abbildung 86 für 2019 und 2020 dargestellt. Um einen späteren Vergleich mit den Strommessdaten an den Arbeitsplätzen zu ermöglichen, wurde auch der Zeitraum Juni 2019 – Mai 2020 betrachtet (siehe Kapitel 5.1.4.3).

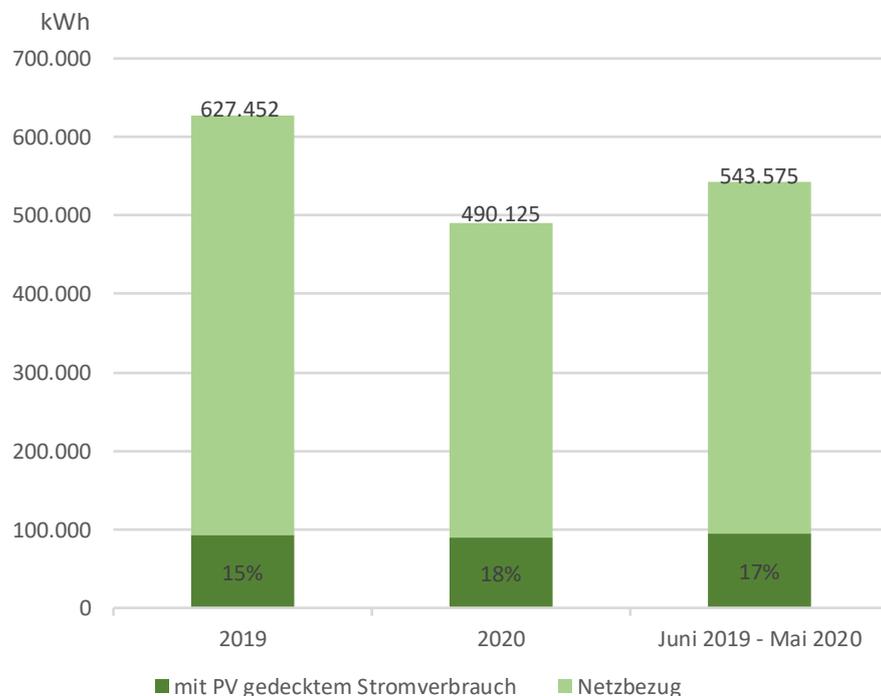


Abbildung 86: Jährlicher Stromverbrauch und PV-Stromerzeugung – Gesamtgebäude

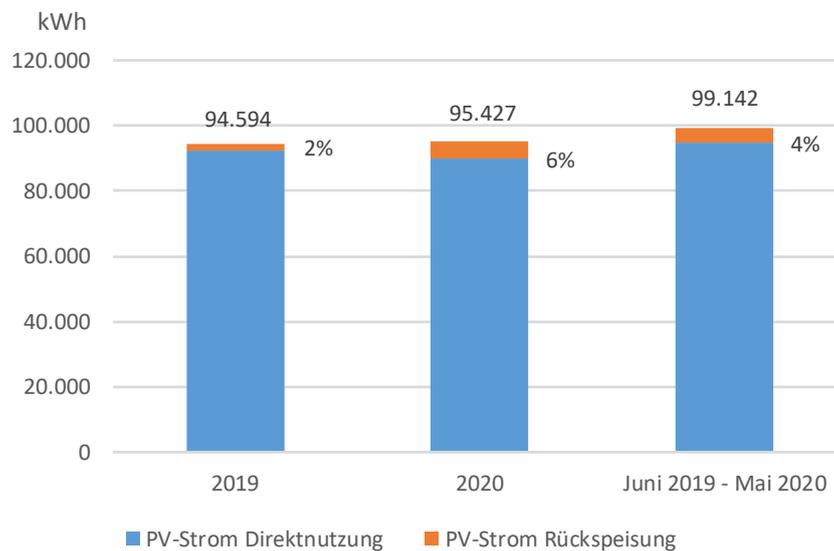
Der jährliche Stromverbrauch liegt im Jahr 2019 bei 627.452 kWh/a. Bezogen auf die Anzahl an Mitarbeitern (angenommen 400) entspricht es 1568 kWh/Pers.a. Dies liegt leicht unter dem Referenzwert von 1687 kWh/Pers.a für sonstige betriebliche Dienstleistung 2013 laut [21]. Pandemiebedingt reduziert sich der Gesamtstromverbrauch um ca. 22 % zwischen 2019 und 2020.

Wird der Zeitraum vor der Pandemie und ohne die ersten Monate der Inbetriebnahme betrachtet, so erhält man für diesen Zeitraum einen Energiebedarf von 543 MWh. Dies

entspricht in etwa 10 % mehr als in der Planung geschätzt. Dies deutet auf mögliches Optimierungspotenzial hin.

Der aus der PV-Anlage erzeugte Strom deckt ca. 15 % des Stromverbrauchs im Jahr 2019. Dieser Anteil erhöht sich im Jahr 2020 auf 18 % aufgrund des niedrigeren Gesamtstromverbrauchs.

Der Anteil des ins Netz rückgespeiste Strom aus der PV-Anlage ist relativ niedrig. Er liegt 2019 bei ca. 2 % und 2020 bei ca. 6 % (siehe Abbildung 87). Die Dimensionierung der Photovoltaik-Anlage für einen Deckungsanteil von 15-18 %, sowie die Hauptnutzungszeiten des Büros während des Tages, führen zu diesem hohen Eigennutzungsanteil.



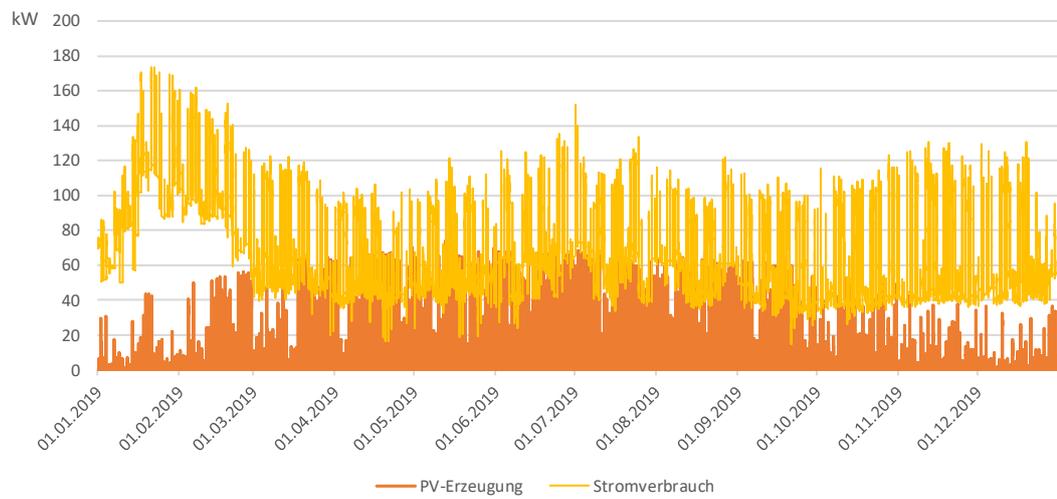
**Abbildung 87: Jährliche PV-Stromerzeugung, Direktnutzung und Netzzurückspeisung**

#### 5.1.4.2 Zeitlicher Verlauf des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung

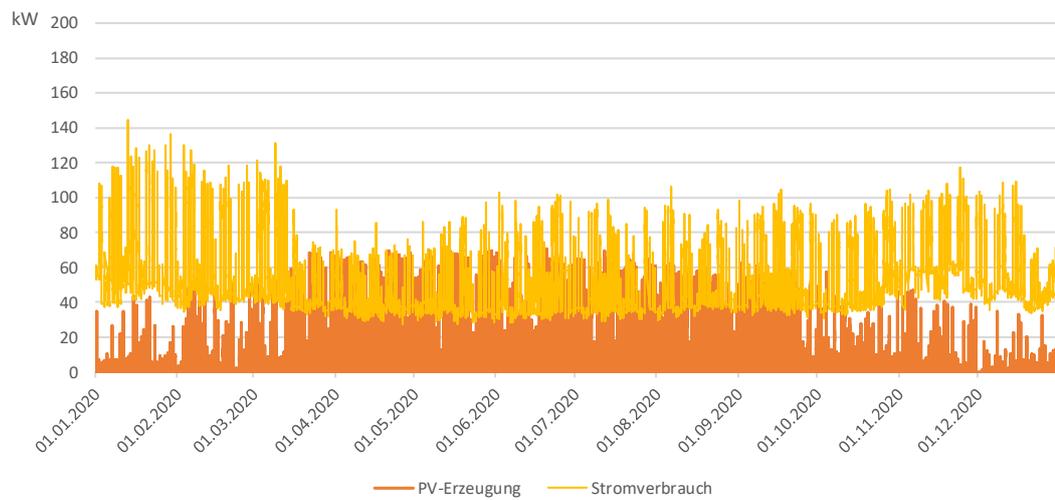
In Abbildung 88 und Abbildung 89 wird der Stromverbrauch sowie die Stromerzeugung der PV-Anlage je Stunde (entspricht der Stromleistung) über einen gesamten Jahresverlauf (2019 sowie 2020) dargestellt. Weiterhin zeigen Abbildung 90 und Abbildung 91 den Verlauf über beispielhafte Winter- und Sommerwochen.

Auf den Grafiken ist eine relativ hohe Dauerleistung in einer Größenordnung zwischen 30 und 40 kW zu erkennen. Die erzeugte elektrische Energiemenge der PV-Module liegt hauptsächlich unter der Grundlast.

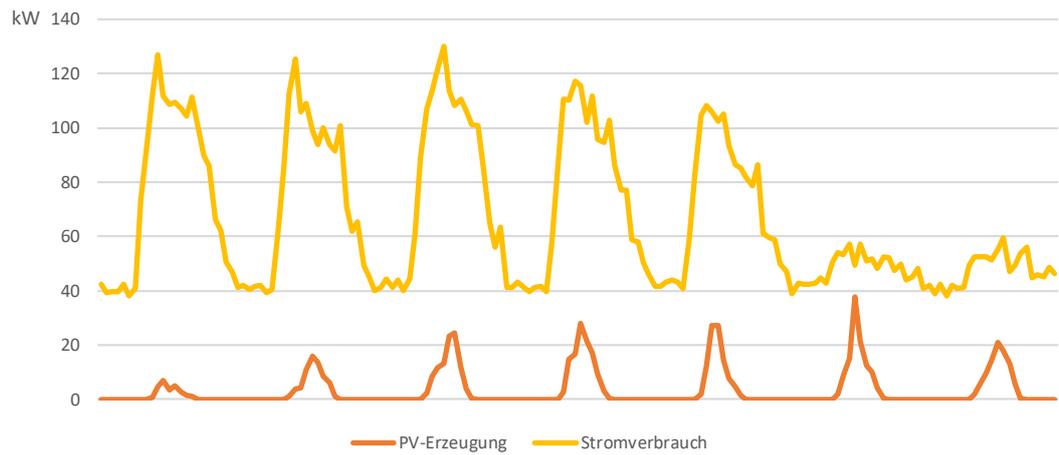
Die zeitliche Übereinstimmung des Stromverbrauchs und der PV-Erzeugung ist in Abbildung 91 gut ersichtlich.



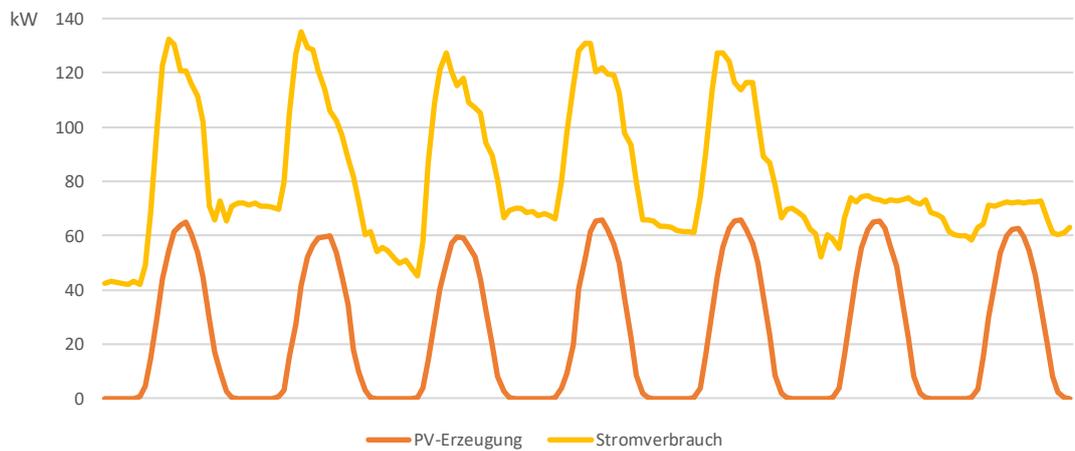
**Abbildung 88: Stromverbrauch- und erzeugung, Jahresverlauf 2019**



**Abbildung 89: Stromverbrauch- und erzeugung, Jahresverlauf 2020**



**Abbildung 90: Stromverbrauch- und erzeugung, Verlauf über eine Winterwoche (18.11.2019 – 25.11.2019)**



**Abbildung 91: Stromverbrauch- und erzeugung, Verlauf über eine Sommerwoche (24.06.2019 – 30.06.2019)**

### 5.1.4.3 Grundlast, Analyse Tagesverlauf

Die Zusammenfassung der Tagesganglinien für 2019 zeigt, dass die geringsten elektrischen Lasten in Wochenendnächten der Übergangszeit auftreten. D.h. im Idealfall werden in diesen Zeiten nur die Serverräume und -kühlung, Kühlräume und -schränke, Brandschutz und Sicherheitssysteme betrieben. Die geringste Grundlast liegt bei ca. 30 kW. Dies entspricht 3 W/m<sup>2</sup> bzw. 18 % der Maximalleistung. Die elektrische Grundlast liegt damit nach [22] im Normbereich zwischen einfachen und hoch technisierten Bürogebäuden. Die Daten im Januar sind kurz nach dem Einzug aufgenommen worden. Der erhöhte Strombedarf insbesondere in den Nächten, kann nur mit Sondermaßnahmen

der ersten Betriebswochen, erklärt werden. Die Sprünge von Nachtstunde zu Betriebsstunde weisen die elektrische Last durch die Nutzer aus, Küche und elektrische Gerätschaften wie PCs, Drucker etc. werden hochgefahren, dies bedarf ca. 60-65 kW. Hierauf wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

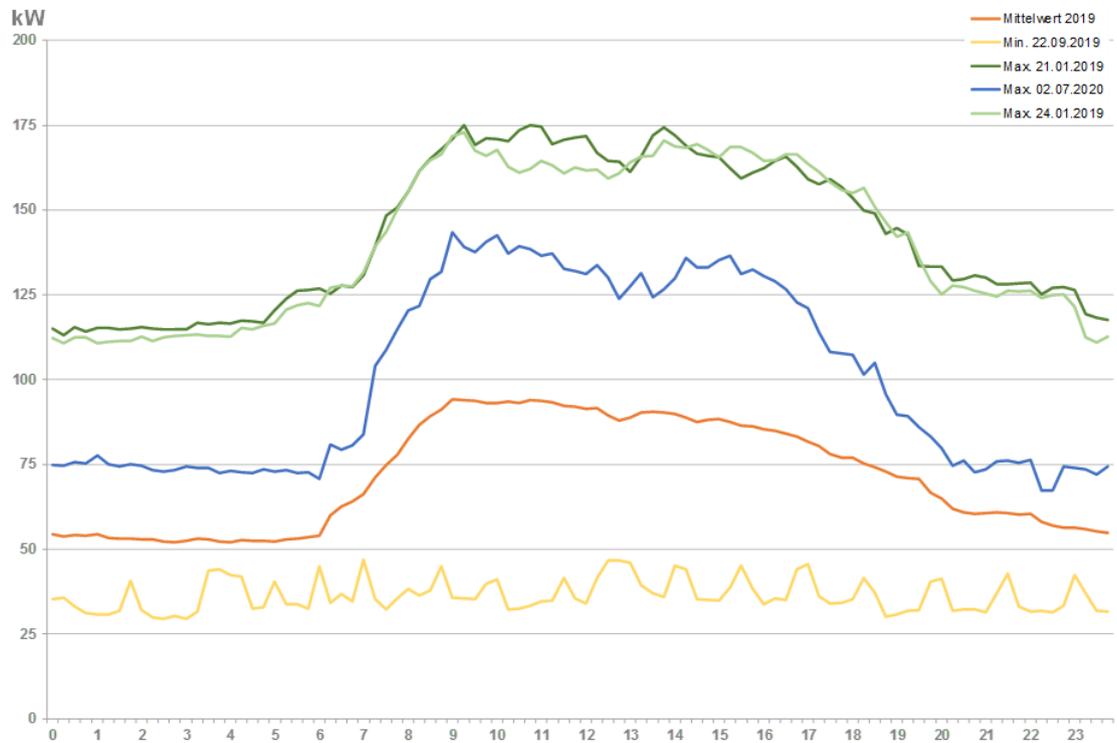


Abbildung 92: Ausgewählte Tagesganglinien der Stromverwendung für 2019

Nach der Zeit der Inbetriebnahme konnte die Last in den Winternächten auf 65 kW reduziert werden. Die Kurve zeigt den typischen Verlauf für Systeme mit einer Nachtabsenkung. Zu Tagesbeginn werden höhere Leistungen abgerufen, um das Gebäude wieder aufzuheizen, dies spiegelt sich auch in den Kurven des Stromverbrauchs wieder. Insgesamt ist der Strombedarf im 2. Jahr signifikant reduziert. Selbst wenn nur der Zeitraum vor der Pandemie betrachtet wird.

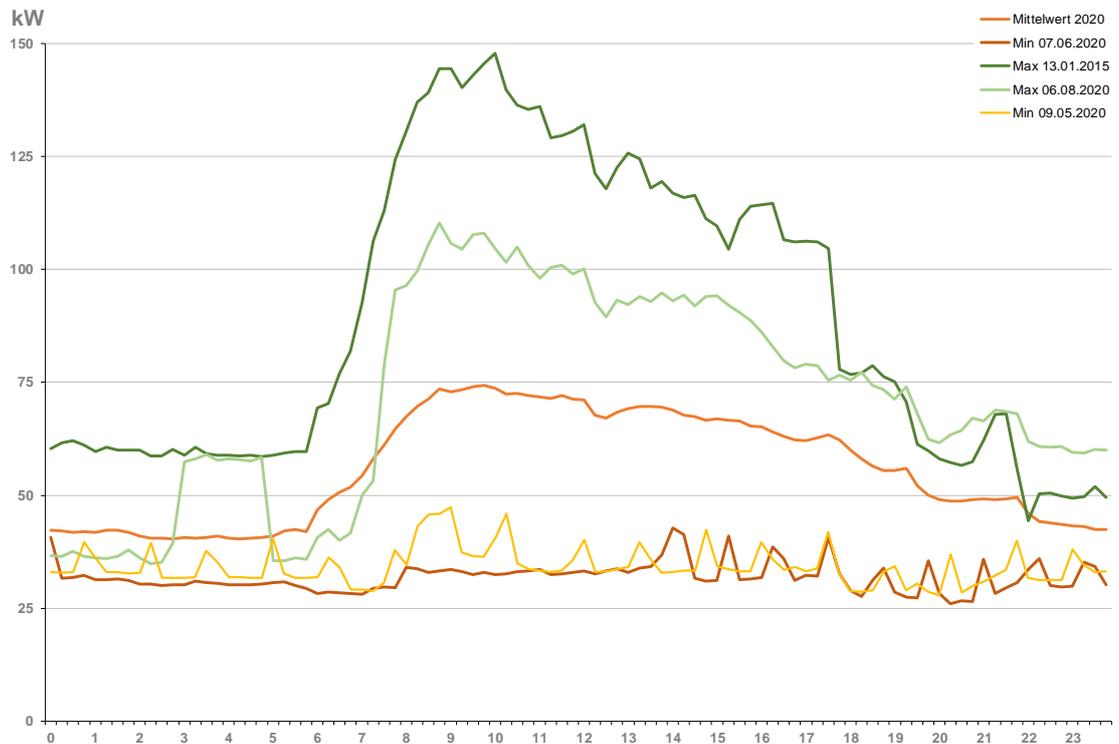


Abbildung 93: Ausgewählte Tagesganglinien der Stromverwendung für 2020

#### 5.1.4.4 Stromverbrauch der Arbeitsplätze – Analyse der Messdaten

Aus dem im Kapitel 5.1.1 beschriebenen Strommesskonzept konnte der Stromverbrauch von 5 Vierer-Arbeitsplätzen (Bürogeräte und Licht separat) und 2 Einzelarbeitsplätzen (nur Strom für Bürogeräte) ausgewertet werden.

Um einen Zeitraum von einem Jahr betrachten zu können und gleichzeitig den Einfluss der Home-Office Situation verbunden mit der Corona-Pandemie möglichst gering zu halten wurde der Zeitraum von 1.6.2019 (Start der Messungen am 23. Mai 2019) bis 31.05.2020 betrachtet.

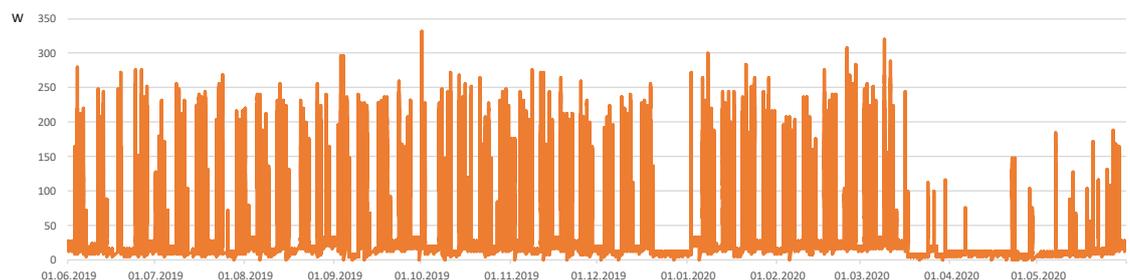
Aus den Daten an den 7 Messstellen wurde ein durchschnittlicher jährlicher Stromverbrauch (für Bürogeräte und für Licht) pro Arbeitsplatz ermittelt. Über die Gesamtanzahl an Arbeitsplätzen im Gebäude wurde der Stromverbrauch für diesen Nutzungsposten hochgerechnet und dem gesamten Stromverbrauch des Gebäudes gegenübergestellt (siehe Tabelle 20).

Der Anteil des hochgerechneten Stromverbrauchs der Arbeitsplätze am gesamten Stromverbrauch erweist sich als sehr gering (75 kWh/a) und bewegt sich am unteren Ende des Spektrums für Verwaltungsgebäude. Der Verbrauch durch die Stehlampen ist im Vergleich mit den Werten der [23] ebenfalls gering. Hier ist zu bemerken, dass es sich

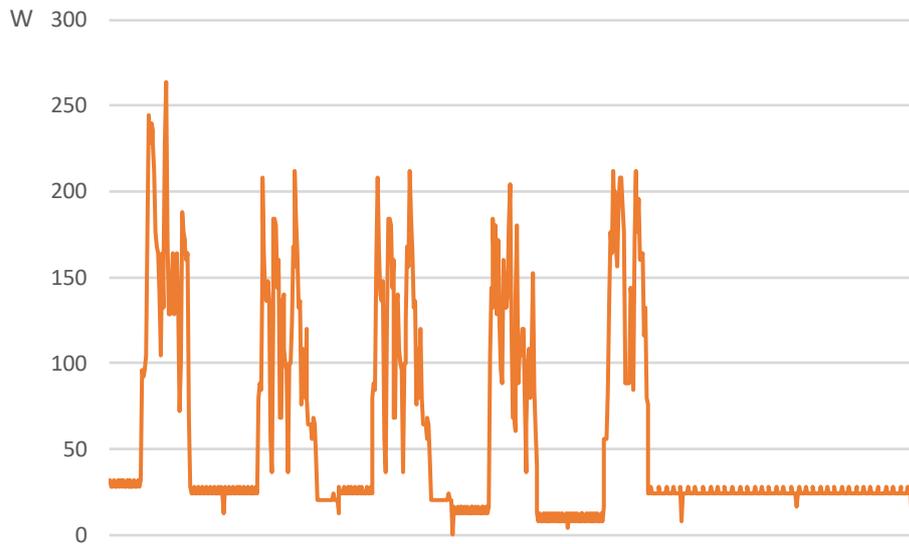
bei den gemessenen Daten nur um die Ausleuchtung des Arbeitsplatzes handelt. In der Alnatura Arbeitswelt wurde Wert auf eine gezielte Beleuchtung gelegt. Eine Grundbeleuchtung ist ebenfalls in sehr reduziertem Maße installiert.

**Tabelle 20: Stromverbrauch Arbeitsplätze**

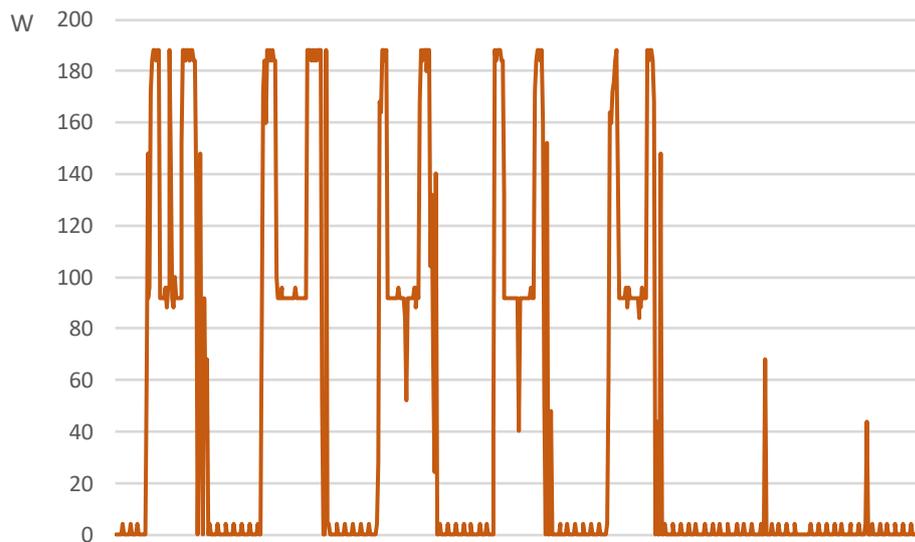
Jährlicher Stromverbrauch für einen Arbeitsplatz	Durchschnittswert aus Messungen	Standardabweichung
Bürogeräte	75.185 Wh/a	10.052 Wh/a
Licht	76.194 Wh/a	18.450 Wh/a
Summe	151.378 Wh/a	
Anzahl Arbeitsplätze ca.	400	
Geschätzter jährlicher Stromverbrauch des Postens Arbeitsplätze für den Zeitraum 1.6.2019 – 31.05.2020	60.551 kWh/a	
Gesamtstromverbrauch des Gebäudes 1.6.2019 – 31.05.2020	543.575 kWh/a	
Anteil Arbeitsplätze an Gesamtstromverbrauch	11,1 %	



**Abbildung 94: Stromleistung an einer Arbeitsinsel mit 4 Arbeitsplätzen (Bürogeräte ohne Licht) über ein Jahr (01.06.2019 - 31.05.2020)**



**Abbildung 95: Stromleistung an einer Arbeitsinsel mit 4 Arbeitsplätzen (Bürogeräte ohne Licht) über eine Woche (18.11. – 24.11.2019)**



**Abbildung 96: Stromleistung an einer Arbeitsinsel mit 4 Arbeitsplätzen (Licht) über eine Woche (18.11. – 24.11.2019)**

Durch die Analyse der Messwerte an den einzelnen Arbeitsplatzmessstellen konnte auch eine durchschnittliche Grundlast des Stromverbrauchs ermittelt werden. Während die Grundlast des Stromverbrauchs für die Beleuchtung der Arbeitsplätze nahe an 0 liegt, beträgt die Grundlast der Bürogeräte im Durchschnitt über die 7 analysierten Messstellen ca. 3,7 W pro Arbeitsplatz. Hochgerechnet auf 400 Arbeitsplätze entspricht dies ca. 1,5 kW Grundlast für sämtliche Arbeitsplätze. Somit hätte der Posten Arbeitsplätze

einen geringen Anteil an der Gesamtgrundlast von 30 bis 40 kW, die dann zu einem großen Teil auf die Gebäudetechnik zurückzuführen wäre.

Dem gegenüber stehen die hohen Grundlasten der Lampen während des Tages. Die Stromlast der Lampen ist während der Betriebszeit mindestens ca. 90 W. Dies entspricht ca. 9 kW Dauerlast für das gesamte Gebäude während der Nutzungszeit.

## 5.2 Kurzzeitmessungen

### 5.2.1 Luftgeschwindigkeit an den Auslässen

In der Alnatura Arbeitswelt gab es Beschwerden seitens der Nutzerinnen und Nutzer über Zugerscheinungen im Erdgeschoss des Gebäudes und über eine nicht ausreichende Zuluftversorgung in den Obergeschossen. Aus diesem Grund wurden am 23.11.2020 Temperaturen und Volumenströme bzw. Luftgeschwindigkeiten im Erdgeschoss, 1. Obergeschoss, 2. Obergeschoss und im Erdkanal selbst gemessen.

#### 5.2.1.1 Ziel der Messung

Ziel der Messung war eine Verifizierung der Zuglufterscheinungen und Identifizierung der Ursache. Hierzu wurde die Lüftungsanlage in unterschiedlichen Lüfterstufen betrieben und die Auswirkungen auf Temperatur und Luftgeschwindigkeit festgehalten.

Mithilfe der Einstellung von unterschiedlichen Lüfterstufen kann geprüft werden, wie viel Zuluft aus den jeweiligen Quellauslässen in allen drei Geschossen des Gebäudes ankommt. Bei dieser Messung wurde die Zuluft auf 15%, 40% und 75% eingestellt. Zu jeder einzelnen ZuluftEinstellung sind Messungen durchgeführt worden, bei 15% konnten keine messbaren Luftgeschwindigkeiten gemessen werden.

#### 5.2.1.2 Messgeräte und Messaufbau

##### **TSI – Lufttemperatur und –geschwindigkeit**

Für die Ermittlung der Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur wird ein TSI Handmessgerät, Air Velocity Meter der Firma VelociCalc (Modellnummer: 9545/9545-A) verwendet. Es handelt sich hierbei um ein multifunktionales Lüftungsmessgerät zur Strömungsgeschwindigkeits- und Lufttemperaturmessung.

Tabelle 21: Air Velocity Meter; Quelle: <https://tsi.com/getmetafile/a9a281f9-8bca-4bcf-8377-2644142b72ef/9545>



Messgerät	VELOCICALC LUFTGESCHWINDIGKEITSMESSGERÄTE
Model	9545
Messbereich Temperatur	-10 °C – 60 °C
Auflösung Temperatur	0,01 °C
Messunsicherheit Temperatur	±0,3 K
Messbereich Geschwindigkeit	0 bis 30 m/s
Auflösung Geschwindigkeit	0,01 m/s
Messunsicherheit Feuchte	+/- 3% des Messwerts oder +/- 0.015 m/s

## Infrarotkamera

Zur Messung der Bauteiloberflächen wird eine Infrarotkamera des Typs E5 der Firma Flir verwendet. Die Kamera gibt Wärmebilder mit entsprechenden Temperaturen aus, die bei der Ermittlung von baulichen und thermodynamischen Problemen nötig sind.

Tabelle 22: Flir Ex Serie; Quelle: <https://www.flir.de/instruments/ex-series/>



Messgerät	Flir Ex-Serie E5
Model	E5
Äquivalenttemperaturkorrektur	Automatisch, basiert auf der Eingabe der reflektierten Temperatur
Genauigkeit	±2 °C oder ±2 % des Messwerts bei Umgebungstemperaturen von 10 °C bis 35 °C und Objekttemperaturen über 0 °C
Konfigurationsanweisungen	Lokale Anpassung von Maßeinheiten, Sprache, Uhrzeit- und Datumsformat
Messpunkt und Fläche	Center-Spot, Bereich mit max./min.
Objekttemperaturbereich	-20 °C bis +250 °C

Die Messung wurde in drei Bereichen ausgeführt. Die Abbildung 97 zeigt, wie die Luftgeschwindigkeit mit dem TSI-Handmessgerät am Boden gemessen wurde. In unterschiedlicher Entfernung vom Quellluftauslass und 8 cm Abstand vom Boden (vgl. Abbildung 98). wurden die Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten aufgenommen. Die jeweiligen Entfernungen zur Wand, die Luftgeschwindigkeit und die Temperatur sind dokumentiert worden. Mithilfe von provisorischen Abdeckungen am Boden (vgl. Abbildung 99) sollte geprüft werden, ob die erhöhten Luftgeschwindigkeiten auf die Zuluft einbringung zurückzuführen sind und ob eine Änderung der Möblierung mit Bodentiefen Blenden einen positiven Effekt auf die Situation haben kann.



**Abbildung 97: Messaufbau für Luftgeschwindigkeitsmessung am Boden mit dem TSI**



Abbildung 98: Messung Luftgeschwindigkeit am Boden in acht Zentimetern Höhe



Abbildung 99: Abdeckung am Boden

Des Weiteren wurde die Zuluft in allen Geschossen direkt im Zuluftscht (vgl. Abbildung 100) und am Austritt aus der Lüftungsanlage gemessen (vgl. Abbildung 101).



Abbildung 100: Messung der Luftgeschwindigkeit mit dem TSI im Schacht



Abbildung 101: Messung der Luftgeschwindigkeit am Auslass RLT

### 5.2.1.3 Messergebnisse

Im Folgenden sind die Messergebnisse, die mit dem TSI-Handmessgerät gemessen worden, dargestellt. In allen drei Geschossen, sowie im Erdkanal und am Auslass des RLT sind Luftgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt worden. Dazu wurde in allen Geschossen die Zuluft direkt im Schacht bei unterschiedlich eingestellter Lüfterstufe (40% und 75%) gemessen. Im Erdgeschoss, sowie im 1. Obergeschoss sind zusätzliche Luftgeschwindigkeitsmessungen am Boden mit dem TSI-Handmessgerät für beide Lüfterstufen (40% und 75%) durchgeführt worden.

**Tabelle 23: Messergebnisse Erdkanal**

Erdkanal:	2.97m x 2m		
	<b>Luftgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Temperatur [°C]</b>	<b>relative Feuchtigkeit [%]</b>
TSI Messung im Erdkanal:		7°C	74.9%

**Tabelle 24: Messergebnisse am Auslass RLT**

Erdkanal am Austritt RLT:	1m x 1.40m		
	<b>Luftgeschwindigkeit [m/s]</b>	<b>Temperatur [°C]</b>	<b>relative Feuchtigkeit [%]</b>
TSI Messung am Auslass:	0.4 - 0.5 m/s	11.6°C	61.6%

**Tabelle 25: Messergebnisse Erdgeschoss bei Zuluft 40%**

Messgerät:	TSI-Handmessgerät			
Datum:	23.11.2020			
ZUL	40%			
Erdgeschoss				
Messung mit TSI im Schacht	0.3 m/s			
	<b>Entfernung von Wand [m]</b>	<b>Höhe über Boden [cm]</b>	<b>Temperatur [°C]</b>	<b>Luftgeschwindigkeit [m/s]</b>
ohne Abdeckung, Arbeitsbereich, am Boden:	3 m	8 cm	20.3 °C	0.4 m/s
	4 m	8 cm	20.3 °C	0.3 m/s
mit Abdeckung, fArbeitsbereich, am Boden:	3 m	8 cm	-	0 m/s
	3.50 m	8 cm	-	0.1 m/s
	4 m	8 cm	-	0.1 m/s
ohne Abdeckung, Flurbereich, am Boden:	1 m	8 cm	19.9 °C	0.4 m/s
	1.50 m	8 cm	19.9 °C	0.4 m/s
	2 m	8 cm	19.9 °C	0.35 m/s
	2.50 m	8 cm	19.9 °C	0.3 m/s
	3 m	8 cm	19.9 °C	0.3 m/s
	3.50 m	8 cm	19.9 °C	0.3 m/s
	4 m	8cm	19.9 °C	0.3 m/s
mit Abdeckung (in Arbeitsbereich), am Boden, Flurbereich:	1 m	8 cm		0.3 m/s
	1.50 m	8 cm		0.3 m/s
	2 m	8 cm		0.3 m/s
	2.50 m	8 cm		0.4 m/s
	3 m	8 cm		0.35 m/s
	3.50 m	8 cm		0.35 m/s
	4 m	8 cm		0.3 m/s

**Tabelle 26: Messergebnisse Erdgeschoss bei Zuluft 75%**

Messgerät:	TSI-Handmessgerät			
Datum:	23.11.2020			
ZUL	75%			
Erdgeschoss				
Messung mit TSI im Schacht (MITTE):	0.4 m/s			
	<b>Entfernung von Wand [m]</b>	<b>Höhe über Boden [cm]</b>	<b>Temperatur [°C]</b>	<b>Luftgeschwindigkeit [m/s]</b>
ohne Abdeckung, MITTE der Wand, am Boden:	3 m	8 cm		0.48 m/s
	3.50 m	8 cm		0.43 m/s
	4 m	8 cm		0.43 m/s

**Tabelle 27: Messergebnisse 1. Obergeschoss bei Zuluft 40%**

Messgerät:	TSI-Handmessgerät			
Datum:	23.11.2020			
ZUL	40%			
1. Obergeschoss				
Messung mit TSI im Schacht:	0.0 m/s			
	<b>Entfernung von Wand [m]</b>	<b>Höhe über Boden [cm]</b>	<b>Temperatur [°C]</b>	<b>Luftgeschwindigkeit [m/s]</b>
ohne Abdeckung, MITTE der Wand, am Boden:	3 m	8 cm		0.0 m/s
	3.50 m	8 cm		0.0 m/s
	4 m	8 cm		0.1 m/s

**Tabelle 28: Messergebnisse 1. Obergeschoss bei Zuluft 75%**

Messgerät:	TSI-Handmessgerät
------------	-------------------

Datum:	23.11.2020
ZUL	75%
1. Obergeschoss	
Messung mit TSI im Schacht (MITTE):	0.15 m/s

**Tabelle 29: Messergebnisse 2. Obergeschoss bei Zuluft 40%**

Messgerät:	TSI-Handmessgerät
Datum:	23.11.2020
ZUL	40%
2. Obergeschoss	
Messung mit TSI im Schacht	0.0 m/s
Messung mit TSI am Boden	0.0 m/s

**Tabelle 30: Messergebnisse 2. Obergeschoss bei Zuluft 75%**

Messgerät:	TSI-Handmessgerät
Datum:	23.11.2020
ZUL	75%
2. Obergeschoss	
Messung mit TSI im Schacht (MITTE):	0.0 m/s

### 5.2.1.3.1 Feststellung Zegerscheinung

Durch die Messungen hat sich bestätigt, dass aus dem Quellauslass im Erdgeschoss deutlich spürbare und messbare Luftgeschwindigkeiten, insbesondere im Bodenbereich, auftreten. Außerdem zeigte sich, dass in den anderen Geschossen, im 1. und 2. Obergeschoss, die Luftgeschwindigkeiten am Boden zwischen 0.0 m/s und 0.1 m/s liegen. Dies bestätigt die Wahrnehmung von Zegerscheinungen der Nutzerinnen und Nutzer im Erdgeschoss. Für die Obergeschosse muss festgestellt werden, dass deutlich weniger Zuluft über die Quellauslässe eingebracht wird.

#### 5.2.1.3.1.1 Luftgeschwindigkeit am Boden

Durch die Messung mit dem TSI-Handmessgerät konnte die Luftgeschwindigkeit in acht Zentimetern Bodenhöhe bei verschiedenen Entfernungen von der Wand gemessen werden. Die Luftgeschwindigkeitsmessungen im Erdgeschoss zeigen, dass zwischen drei

und vier Metern Entfernung von der Wand Luftgeschwindigkeiten in Bodenhöhe von 0.3 m/s bis 0.4 m/s auftreten. Die Luftgeschwindigkeitsmessung von 0.3 m/s bis 0.4 m/s sind in der Mitte der Wand, sowie links der Wand gleich schnell (vgl. Tabelle 25). Bei einer Abdeckung im Bereich der Mitte, sind links der Wand die Luftgeschwindigkeiten gleich, wie ohne eine Abdeckung (vgl. Tabelle 25). Wird die Lüfterstufe auf 75% hochgefahren, steigen ebenso die Luftgeschwindigkeiten am Boden des Erdgeschosses und sind zwischen 0.4 m/s und 0.5 m/s messbar (vgl. Tabelle 26).

Im 1. Obergeschoss wurde dieser Messvorgang wiederholt. Hier zeigt sich, dass bei einer Entfernung von drei bis vier Metern von der Wand Luftgeschwindigkeiten von 0.0 m/s bis 0.1 m/s am Boden auftreten (vgl. Tabelle 27). Beim 2. Obergeschoss wurde dieser Messvorgang nicht wiederholt, da hier sehr wahrscheinlich das Phänomen vom 1. Obergeschoss eintritt.

Die Messungen mit dem TSI-Messgerät im Schacht selbst haben zusätzlich gezeigt, dass im Erdgeschoss bei 40% Zuluft 0.3 m/s und bei 75% Zuluft etwa 0.4 m/s ankommen. Im 1. Obergeschoss, sowie im 2. Obergeschoss, ist die Luftgeschwindigkeit 0.0 m/s bei einer Zuluft von 40% (vgl. Tabelle 27 und Tabelle 29). Bei 75% Zuluft ist im 1. Obergeschoss eine Luftgeschwindigkeit von 0.15 m/s messbar (vgl. Tabelle 28). Im 2. Obergeschoss sind bei beiden Zulufteneinstellungen (40% und 75%) Luftgeschwindigkeiten von 0.0 m/s messbar (vgl. Tabelle 30).

#### **5.2.1.3.1.2 Lufttemperatur am Boden**

Die Lufttemperatur am Boden im Erdgeschoss liegt zwischen 19.9°C und 20.3°C (vgl. Tabelle 25). Im Erdkanal selbst beträgt die Temperatur der Zuluft 7°C und am Auslass des RLT misst das Temperaturmessgerät 11.6°C (vgl. Tabelle 23 und Tabelle 24).

#### **5.2.1.3.2 Luftverteilung**

In allen drei Geschossen sind Bilder von den Quellauslässen mit der IR-Kamera aufgenommen worden, bei maximaler 75 % Lüfterstufe

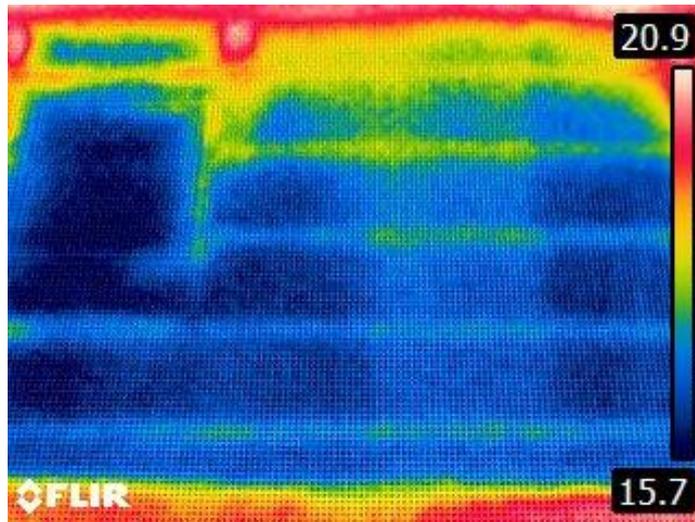


Abbildung 102: IR-Bild vom vertikalen Kanal im EG



Abbildung 103: Bild ohne IR-Kamera vom vertikalen Kanal im EG

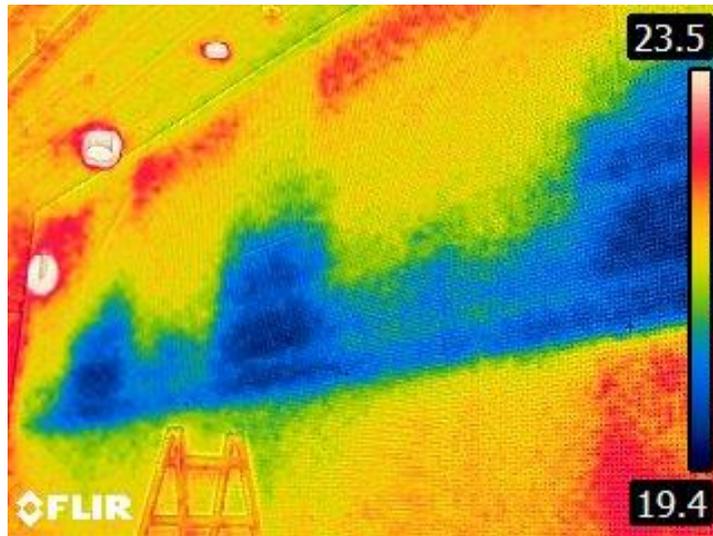


Abbildung 104: IR-Bild vom vertikalen Kanal im EG, größerer Ausschnitt

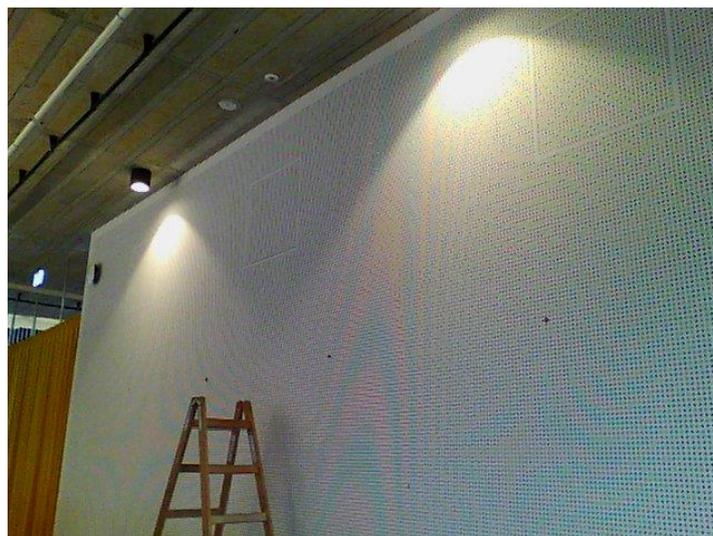


Abbildung 105: Bild ohne IR-Kamera vom vertikalen Kanal im EG, größerer Ausschnitt

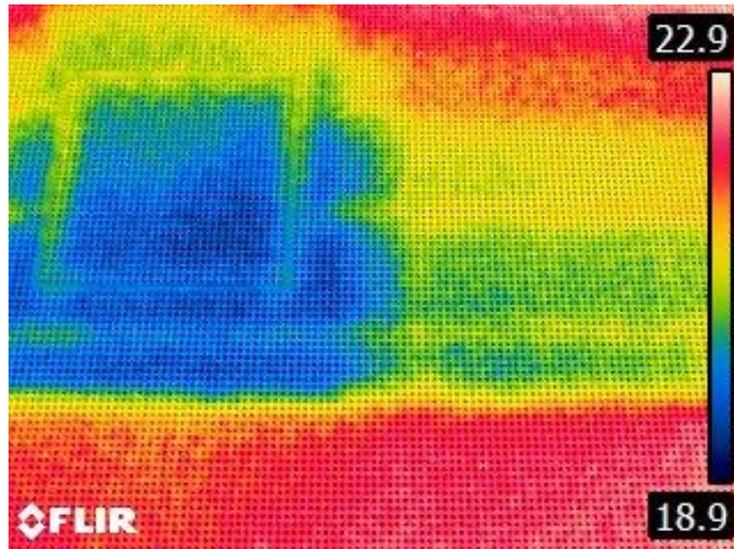


Abbildung 106: IR-Bild vom vertikalen Kanal im OG1

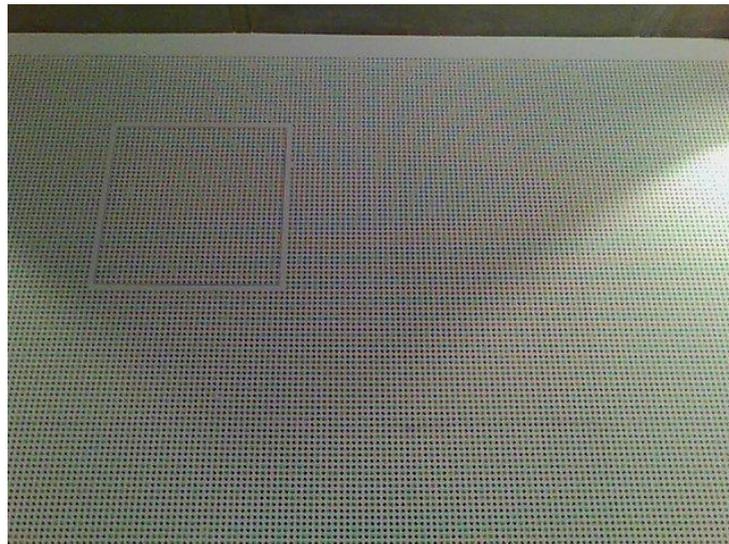


Abbildung 107: Bild ohne IR-Kamera vom vertikalen Kanal im OG1



Abbildung 108: IR-Bild vom vertikalen Kanal im OG2

#### 5.2.1.4 Fazit und Optimierung

In den Messungen zeigt sich, dass die wesentlichen Faktoren, die zu Zegerscheinungen führen, Temperatur und Luftbewegung, außerhalb der gewünschten Bereiche liegen. Für die Luftgeschwindigkeit werden Werte unter 0.2 m/s und für die Temperatur in etwa Raumtemperatur angestrebt.

Im Anschluss an die Messung wurden Daten der GLT analysiert und festgestellt, dass die Sollzulufttemperaturen in der RLT nicht erreicht werden, wenn die Raumheizung Wärme anfordert. In Zusammenarbeit mit dem unabhängigen Berater Speelmanns und dem Techniker der MSR-Technik wurde das Problem eingekreist und identifiziert.

Die Ursache waren fehlerhaft programmierte Pumpen. Die nicht auf einander abgestimmte Einstellung der Förderhöhe der Heizkreispumpen führte in der Heizperiode häufig zu dem Fall, dass die Pumpe, die die Heizregister in den Lüftungsgeräten versorgt, keinen ausreichenden Massenstrom förderte. Eine Umstellung führte augenblicklich zu einer Lösung dieses Problems. Die Sollzulufttemperatur wird seitdem erreicht.

Die erhöhte Luftgeschwindigkeit im Bodenbereich des Erdgeschosses ist auf den Betrieb der Lüftungsanlage mit zu hoher Lüfterstufe und die ungleichmäßige Verteilung der Zuluftmenge über die Geschosse zurückzuführen. Die geförderte Luftmenge durch die Lüftungsanlagen entsprach nicht wie geplant der notwendigen Menge für einen hygienischen Luftwechsel. Um die Zegerscheinungen zu reduzieren wurden die Luftmengen reduziert. Die Lüftungsanlage läuft nun im unteren Teillastbetrieb.

Aufgrund der hybriden Nutzung der Lüftungskanäle in den Gebäudekernen, als Zuluftkanäle und als Entrauchungskanäle für die unteren Geschosse ergeben sich Abhängigkeiten, die keine einfachen technischen Lösungen für einen Abgleich zulassen. Aufgrund der offenen Struktur des Gebäudes wird die Luft trotz ungleichmäßiger Einbringung ausreichend verteilt.

Zum Zeitpunkt des Berichts sind keine weiterführenden baulichen Maßnahmen zur Behebung der ungleichmäßigen Lufteinbringung geplant bzw. durchgeführt.

### **5.2.2 Kaltluftabfall an Oberlichter**

In der Alnatura-Arbeitswelt auf dem Alnatura-Campus in Darmstadt gibt es Beschwerden seitens der NutzerInnen bezüglich Zugluft im Erdgeschoss und dem zweiten Obergeschoss. Vor Ort wurden Messungen zu Luft- und Oberflächentemperaturen sowie Luftgeschwindigkeiten angestellt und mittels Rauchversuchen die Luftströmung visualisiert. Die Strömungs/Temperatur-Messungen und Rauch-Visualisierungen wurden miteinander kombiniert, um daraus resultierend Ursachen und mögliche Verbesserungen auszuarbeiten.

Der Bürobereich des Gebäudes wird natürlich mit folgenden Lüftungsszenarien belüftet. Im kalten Winter oder heißen Sommer wird Außenluft primär über ein Erdkanalsystem im UG des Gebäudes vorkonditioniert. Die kalte Außenluft wird im Winter erwärmt und im Hochsommer abgekühlt. Über drei zentrale Schächte jeweils im Nord- und Südteil des Gebäudes wird vorkonditionierte Luft eingequellt. Unabhängig vom Lüftungsszenario gibt es Beschwerden der NutzerInnen über Zugluft durch die Lüftung im Erdgeschoss.

An Tagen mit Außentemperaturen kleiner 0°C treten vermehrt Zugscheinungen im Bereich der Arbeitsplätze im Nordteil des Gebäudes auf, die hin zum Atrium gerichtet sind und gleichzeitig an der Westfassade sitzen. Umluftkonvektoren an der Westfassade zur Minderung des Kaltluftabfalls sind zudem kontraproduktiv und erhöhen das Unbehagen der NutzerInnen an den entsprechenden Stellen.

### 5.2.2.1 Messgeräte (CS)

#### TSI

Für die Ermittlung der Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur wird ein TSI Handmessgerät, Air Velocity Meter der Firma VelociCalc (Modellnummer: 9545/9545-A) verwendet. Es handelt sich hierbei um ein multifunktionales Lüftungsmessgerät zur Strömungsgeschwindigkeits- und Lufttemperaturmessung. Während der Versuche wurde damit die Luftgeschwindigkeit und Temperatur an den kritischen Bereichen der Arbeitsplätze und an den Quellluftauslässen der Zuluft sowie der Konvektoren gemessen. Siehe Tabelle 21.

#### Infrarotkamera

Zur Messung der Bauteiloberflächen wird eine Infrarotkamera des Typs E5 der Firma Flir verwendet. Die Kamera gibt Wärmebilder mit entsprechenden Temperaturen aus, die bei der Ermittlung von baulichen und thermodynamischen Problemen nötig sind. Im Rahmen der Analyse wurden damit die Oberflächentemperaturen der Wände, Fenster (Glas + Rahmen) und der Schreibtische in den Arbeitsbereichen gemessen. Siehe Tabelle 22.

#### Nebelmaschine

Um die Luftströmung im Gebäude sichtbar zu machen, wird Kunstnebel genutzt und dessen Strömungsverlauf über Videoaufzeichnung dokumentiert. Zur Nebelerzeugung wird eine Nebelmaschine: Stairville AF-150 DMX verwendet.



Abbildung 109: Verwendete Nebelmaschine zur Abbildung der Luftströmungen im Gebäude;  
Quelle: [https://www.thomann.de/de/stairville\\_af\\_150\\_dmx\\_fog\\_machine.htm](https://www.thomann.de/de/stairville_af_150_dmx_fog_machine.htm)

### 5.2.2.2 Messkonzept

Im Rahmen der Messung sollten 2 unterschiedliche Phänomene im Gebäude untersucht werden. Zum einen die Zugluft an den Arbeitsplätzen, siehe , ergründen und die Ursachen bestimmen. Zum anderen die Luftverteilung durch die Lüftungsanlage.

Zugluft:

Vermutet werden Kaltluftströme durch Kaltluftabfall am Oberlicht und/ oder Undichtigkeiten an den Oberlichtklappen.

Durch Raucheinbringung wird der Luftstrom visualisiert Kaltluftabfälle können identifiziert werden. Hierzu wird der Rauch direkt an den Oberlichtern eingebracht und mit Kameras aus verschiedenen Perspektiven beobachtet.

Mit der Wärmebildkamera wurde gezielt nach kalten Oberflächen, die einen Kaltluftabfall begünstigen, oder Undichtigkeiten im Oberlicht oder an der Fassade gesucht.

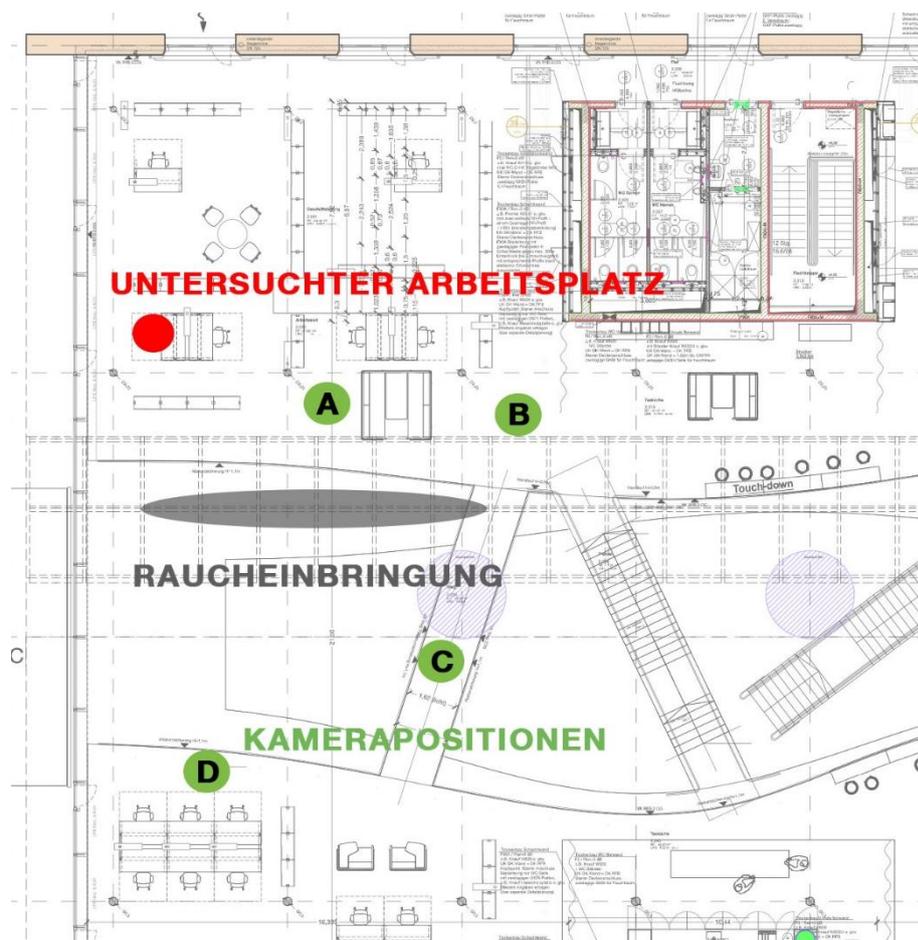


Abbildung 110: Messaufbau Rauchversuch Position 1

### 5.2.2.3 Auswertung

Mit den Rauchversuchen werden Luftströmungen bzw. Luftbewegungen visualisiert. Bewegungen sind zeitabhängig und damit schwierig über Bilder zu bestimmten Zeitpunkten darzustellen.

Es ist deshalb zu Beginn der Ergebnisdarstellung festzuhalten, dass alle Rauchversuche mittels Videokamera aufgezeichnet wurden. Die Aufzeichnungen sind gemeinsam mit dem Bericht an den Auftraggeber übermittelt worden. Dennoch werden in der folgenden Ergebnisdarstellung Bildausschnitte genutzt, um die Sachlage zu erläutern. Es wird zusätzlich auf entsprechende Videos verwiesen.

#### 5.2.2.3.1 Innenliegender Sonnenschutz nicht gezogen, Konvektoren aus, Lüftung aus

Abbildung 111 bis Abbildung 114 zeigen Aufnahmen der Wärmebildkamera mit entsprechenden Oberflächentemperaturen des Daches und Fassade. Es sind dabei Oberflächentemperaturen der Verglasung kleiner 18°C zu erkennen. Die Raumluft kühlt an den Oberflächen ab und bewegt sich an den Oberlichtern nach unten.

Beim Rauchversuch ( vgl. Abbildung 115) strömt die Kaltluft entlang der Oberlichter bis zum Querträger. Dieser bildet eine Strömungskante, die dafür sorgt, dass die kalte Luft vertikal zu Boden fällt. Ein Teilstrom der Kaltluft fällt dabei auch auf den kritischen Arbeitsplatz. Über eine Betrachtung von ca. 10min bildet sich daraus ein Kaltluftsee in den Arbeitsbereichen, der gegebenenfalls Zugscheinungen hervorrufen kann.



Abbildung 111: Infrarotauflösung Außenfassade West



Abbildung 112: Referenz zu Abbildung links



Abbildung 113: Infrarotauflösung Oberlichter



Abbildung 114: Referenz zu Abbildung links



Abbildung 115: Rauchversuch an den Oberlichtern ohne Blendschutz und Konvektoren

### 5.2.2.3.2 Innenliegender Sonnenschutz nicht gezogen, Konvektoren an, Lüftung aus

Die Umluftkonvektoren an der Fassade wirken dem Kaltluftabfall und der Bildung des Kaltluftsees entgegen, indem Sie warme Luft an der Außenfassade nach oben befördern (vgl. Abbildung 116, Nebelschwade nach oben). Lokale Untersuchungen am kritischen Arbeitsplatz zeigen ein homogenes Nebelfeld, hier besteht keinerlei Luftbewegung oder Verwirbelung in dem Arbeitsbereich.

Die gemessenen Temperaturen an den Umluftkonvektoren sind größer  $26^{\circ}\text{C}$  und unterstützen zudem die Behaglichkeit. Die nun erwärmte Luft blockt somit die Kaltluft der Oberlichter. Wie in Abbildung 117 zu erkennen wird der Nebel in das Atrium zurückgedrückt und gelangt nicht in den Arbeitsbereich. Zugerscheinungen durch Kaltluftabfall sind bei Heizbetrieb der Konvektoren auszuschließen.



Abbildung 116: Rauchversuch an den Konvektoren



**Abbildung 117: Rauchversuch an den Oberlichtern ohne Blendschutz mit Konvektoren**

#### **5.2.2.3.3 Innenliegender Sonnenschutz nicht gezogen, Konvektoren aus, Lüftung aus**

Wie Abbildung 118 zu entnehmen beträgt die Oberflächentemperaturen des Blendschutzes annähernd die 21 °C, wodurch es zu einer geringen Abkühlung der Luft im Dachgiebel und folglich zu keinem, mit den verwendeten Mitteln messbaren, Kaltluftabfall kommt. Der Rauchversuch (vgl. Abbildung 120) zeigt, die Konvektoren sorgen zudem für Warmluft in den Arbeitsbereichen, die entsprechenden Kaltluftabfällen oder Zugluft entgegenwirkt. Zugerscheinungen durch Kaltluftabfall sind bei Heizbetrieb der Konvektoren auszuschließen.



Abbildung 118: Infrarotauflösung Oberlichter mit Blendschutz



Abbildung 119: Referenz zu Abbildung links



Abbildung 120: Rauchversuch an den Oberlichtern mit Blendschutz und Konvektoren

#### 5.2.2.3.4 Geschlossen

Auch ohne Konvektoren ist aufgrund hoher Oberflächentemperaturen des Blendschutzes kein Kaltluftabfall erkennbar. Zugscheinungen durch Kaltluftabfall bei geschlossener Sonnenblende sind auszuschließen.

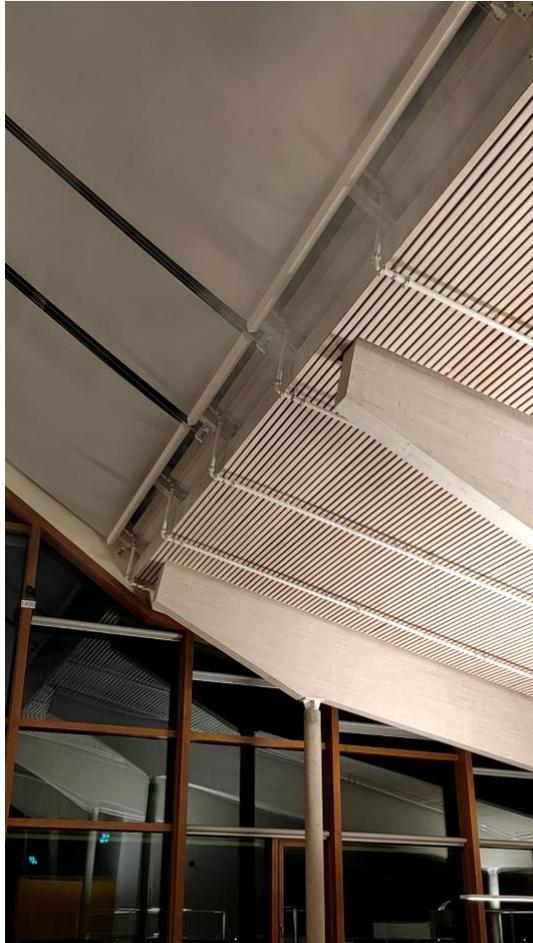


Abbildung 121: Rauchversuch an den Oberlichtern mit Blendschutz ohne Konvektoren

#### 5.2.2.4 Fazit und Optimierung

Mit der Einbringung des Rauchs, konnten die Luftwege im offenen Raum sichtbar gemacht und beobachtet werden. Videoaufnahmen zeigen deutlich den Luftweg bei den unterschiedlichen Szenarien.

Bei ungezogenem Blendschutz und keinen erzwungenen Luftströmungen zeigen die Beobachtungen und Messungen, dass ein spürbarer und messbarer Kaltluftabfall im Bereich der Oberlichter initiiert wird, insbesondere die Temperaturen der offenbaren Elemente sind signifikant unter Innenraumtemperatur mit ca. 13 °C.

Die Luft bewegt sich entlang der Oberlichter nach unten und fällt zu einem großen Teil vertikal ab. Direkt unter der Kante befindet sich teilweise Luftraum bis zum EG und teilweise der Flur. Die Luftgeschwindigkeit ist in diesem Bereich am höchsten. Ein Teil der Luft wandert weiter entlang der Decke und fällt dann u.a. auf den untersuchten Arbeitsplatz.

Im Rahmen der Kurzzeitmessung wurden unterschiedliche Betriebszustände getestet.

Der Betrieb der Lüftung hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Luftbewegung in OG2.

Der Betrieb der Konvektoren zeigt, dass sich die induzierte Luftbewegung einen positiven Einfluss auf die Luftbewegung im Bereich der Arbeitsplätze hat. Es konnte klar erkannt werden, dass die vom Oberlicht abfallende Kaltluft weiter in die Gebäudemitte gedrückt wird. Im Bereich der Arbeitsplätze kein Einfluss vom Kaltluftabfall erkennbar ist. Das Zugluftrisiko kann, während dem Betrieb der Konvektoren ausgeschlossen werden. Dies gilt für die beiden Flächen mit verglasten Fassade im Osten und Westen des Gebäudes. Im innenliegenden Bereich sind keine Konvektoren installiert.

Der gezogene Blendschutz unterbricht den Luftstrom zu den kalten Oberflächen. Am Blendschutz bleibt die Luftbewegung stabil. Es kommt zu keinem Kaltluftabfall. Nachteil ist der reduzierte Tageslichteintrag.

Dem Bauherrn wurden unterschiedliche Wege zur Reduzierung des Kaltluftabfalls aufgezeigt. Neben den oben genannten Maßnahmen kann eine angepasste Möblierung den Kaltluftabfall an den Arbeitsplätzen verhindern.

Es ist anzumerken, dass die Tests nachts zwischen 3 und 7 Uhr durchgeführt wurden. Das Gebäude war bis zu diesem Zeitpunkt nicht im normalen Tagbetrieb, es gab keine Wärmeabgabe durch Personen oder elektrische Gerätschaften, die lokal einen Einfluss auf die Luftbewegung haben können.

## 5.3 Nutzerzufriedenheit und Behaglichkeit

Dieses Kapitel ist ein Auszug aus [1].

Neben dem Monitoring wurde in der Alnatura-Arbeitswelt auch eine Befragung der Nutzenden durchgeführt. Diese Umfrage dient der sichtbaren Darstellung der subjektiven Meinung der Mitarbeitenden. In einigen Fällen spiegelt sie sehr schön die zu erwartenden Ergebnisse der Messwerte wieder. In anderen Fällen gehen die gefühlte Behaglichkeit und die Messungen auseinander, was wiederum Raum für interessante Schlussfolgerungen entstehen lässt. Die Umfrage konnte auf der Plattform SurveyMonkey.de als Online-Fragebogen oder auch in Papierform durchgeführt werden. Um eine vergleichbare Basis für die Auswertung zu erhalten wurden diese Daten ebenfalls auf SurveyMonkey.de eingepflegt.

Der Fragebogen bestand aus ca. 20 Fragen mit einer geschätzten Bearbeitungsdauer von insgesamt maximal 5 Minuten. Vor dem eigentlichen Fragenteil konnten die teilnehmenden Personen mittels eines Lageplans auswählen, in welchem Bereich des Gebäudes ihr Arbeitsplatz liegt. Dies ist für den späteren Vergleich mit dem Standort der angebrachten Messgeräte von hoher Wichtigkeit. Die weiteren Fragen zu den Themen Lüftungsverhalten, Sonnenschutz sowie dem sommerlicher- und winterlicher Raumkomfort konnten durch einfaches Verstellen eines Schiebereglers in fünf Stufen beantwortet werden.

Mittels der so erhaltenen Resultate konnten die Ergebnisse des Monitorings sehr schön mit dem subjektiven Empfinden der Nutzer korreliert werden.

### 5.3.1 Umfrage zur Behaglichkeit

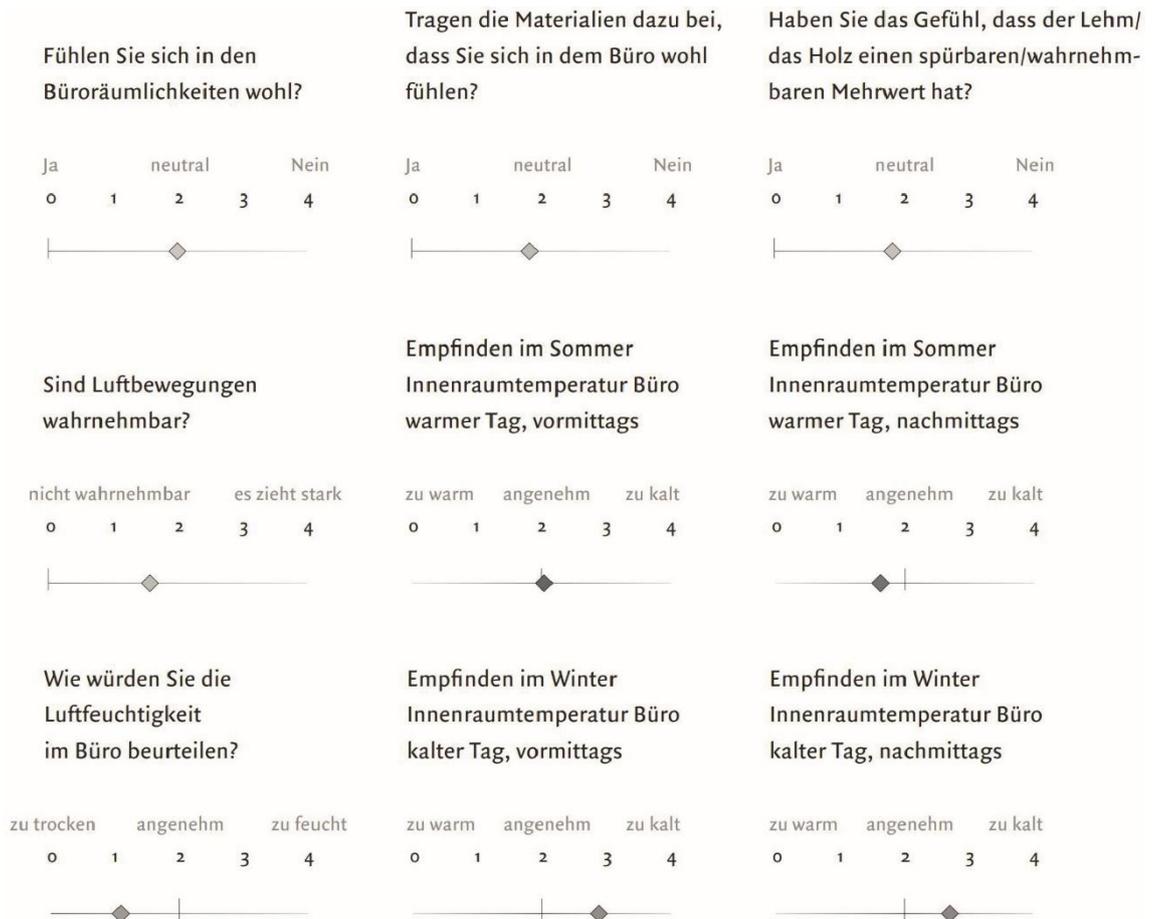


Abbildung 122: Umfrage zur Behaglichkeit

### 5.3.2 Auswirkungen auf die Aufenthaltsqualität

Bauten entstehen für die Menschen, die sich in ihnen befinden. Wenn es sich dabei um ihren Arbeitsort handelt, dann ist die Qualität des Aufenthalts entscheidend für die Zufriedenheit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in einem Betrieb. Die Untersuchungen richteten deshalb den Blick auch auf die Zufriedenheit der Angestellten. Die Fragen gingen unter anderem darauf ein, welche Rolle der Lehm für diese Beurteilung spielen.

Das subjektive Urteil der Mitarbeitenden der Alnatura-Arbeitswelt ist zwar positiv, doch wird dem Lehm kein besonderer Mehrwert zugesprochen und er spielt auch keine entscheidende Rolle dabei, ob sich die Menschen wohl fühlen. Das ist eine erstaunliche Feststellung, wo doch gerade dem Lehm gemeinhin eine bedeutende Wirkung auf das Raumklima zugesprochen wird. Die Frage nach der Rolle des Materials bezüglich Aufenthaltsqualität lässt sich jedoch offenbar nicht so einfach beantworten.

### **5.3.3 Auswirkungen auf das Raumklima**

Die Messungen der bauphysikalischen Werte bestätigen weitgehend die Annahme, dass Lehm sich positiv auf das Raumklima auswirkt. Wenn einzelne Aspekte wie die Nachtauskühlung bei der Alnatura-Arbeitswelt noch nicht so gut funktionieren wie vorhergesehen, dann lässt sich dies jeweils schlüssig erklären. So war dort die Steuerung der Oberlichter offenbar noch nicht optimal eingestellt. Auf der anderen Seite sind auch positive Effekte nicht zwingend das Resultat der Wahl von Lehm als Baustoff. Es lässt sich nicht eindeutig quantifizieren, welchen Beitrag die Wahl des Materials zum Klima leistet, denn jedes Bauwerk erreicht seine klimatischen Ziele mit einer Summe von verschiedenen Maßnahmen, die alle zusammenwirken.

Bei der Alnatura-Arbeitswelt gewährleistet das offene Atrium im Zusammenspiel mit den thermisch aktivierten Bauteilen die Nachtauskühlung.

Der Verzicht auf Technik ist natürlich nicht auf Bauten aus Lehm beschränkt, er lässt sich ebenso mit Stahlbeton und Glas erreichen. Doch es scheint in der Natur der Sache zu liegen, dass Bauherrschaften und Planende, die sich für natürliche Materialien interessieren, einen Hang zu Lösungen haben, die den Menschen als aktiven Faktor in seiner Umgebung sehen. Dies führt dann zu Projekten, bei denen mit den Mitteln der Architektur – Ausrichtung, Verschattung, Glasanteil, Verteilung der Masse, Begrünung etc. – die wichtigsten Eckpunkte für einen angenehmen Aufenthalt gewährleistet sind. Die Menschen werden in die Pflicht genommen, selbst für ihr Klima zu sorgen, indem sie Einfluss auf das Gebäude nehmen.

Wenn die Obhut über die klimatischen Bedingungen an einen immer ausgefeilteren Park von Maschinen und Sensoren delegiert wird, muss die Architektur diese Probleme nicht mehr lösen. Dann ist auch die Wahl des Materials lediglich eine Frage des Stils und der Ideologie. Bei der Alnatura-Arbeitswelt jedoch verschränken sich konzeptionelle Fragen und der Einsatz des Materials miteinander. Damit unterstützen die beiden Aspekte die Wirkung auf das Raumklima und schaffen die Basis, um mit möglichst wenig Technik auszukommen. Materialgerechtes Bauen und der Lowtech-Ansatz ergänzen sich als Konzepte sehr gut.

### **5.3.4 Langlebigkeit dank Veränderbarkeit**

Die Lebensdauer einer Gewerbeimmobilie ist oft an ihre Nutzung gekoppelt. Das Gebäude wird aufgrund der aktuellen Bedürfnisse und Prozesse geplant und ist für diese dimensioniert. Teilweise werden Fabriken nach ihrer Verwendung auch wieder gänzlich zurückgebaut. Eine der Branchen, die auf diese Weise operiert, ist die Automobilindustrie, die für gewisse Fahrzeugtypen eigene Fabriken erstellt, die nach Einstellung der

Produktion wieder verschwinden. Dies führt zu einer enorm kurzen Lebensdauer, was sich auch im Phasenvergleich der Ökobilanz zeigt. Bei der Untersuchung der Produktionshallen rechnet man schon gar nicht mit einer Instandstellung, denn der Betrachtungshorizont beträgt lediglich 20 Jahre. Bei einer so kurzfristigen Planung spielt die Materialisierung kaum eine Rolle.

Wenn eine Werkhalle jedoch räumliche Flexibilität bietet, kann sie auch über diese Zeit hinaus Raum für die Produktion bieten. Dank einer veränderten Sichtweise entstehen völlig andere Möglichkeiten bei der Erstellung von Gewerbebauten. Der Handlungsraum für die Planung wird größer. Die Perspektive einer langfristigen, anpassungsfähigen Nutzung könnte ein Türöffner für Holz und Lehm im Gewerbebau sein, da sich die Einberechnung einer Instandstellung – vor allem im Zusammenspiel mit einem tendenziell höheren Grad an Technisierung bei einer konventionellen Bauweise – wesentlich auf die Bilanz eines Gebäudes auswirken würde. Dann wären Lowtech-Konzepte und natürliche Werkstoffe im Vorteil.

### **5.3.5 Architektonischer Ausdruck**

Einen Gewerbebau in Lehm zu errichten, ist immer auch eine Einladung an die Architektur. Das Baumaterial hat seine eigene Logik in der Fügung, ebenso wie sich der Einsatz besonders dann eignet, wenn die Oberflächen sichtbar bleiben. Nur wenn Lehmwände nicht verkleidet sind, können sie Feuchtigkeit und Wärme aufnehmen und wieder abgeben. Dies wirkt sich nicht nur auf die Behaglichkeit aus, sondern ebenso auf die Fragen nach einem angemessenen architektonischen Ausdruck. Mit Lehm lassen sich gewerblich genutzte Bauten mit einer ökologischeren Bauweise errichten, die einen angenehmen Aufenthalt ermöglicht und darüber hinaus auch eine Architektur bietet, die ihre Werte nach außen zeigt.

# Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Nach ca. 5 Jahren der Planung und der Errichtung wurde die Alnatura-Arbeitswelt im Januar 2019 bezogen. Es handelt sich hierbei um den größten Lehmgebäude Europas. Mit Hilfe der Förderung der DBU konnten wichtige Themen rund um den Baustoff Lehm untersucht werden.

Wie kann Innovation im Planungsprozess integriert werden? Wie werden die erarbeiteten Konzepte effizient übergeben und die Umsetzung sichergestellt?

Welchen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck weisen Lehmgebäude im Vergleich zu konventionellen Konstruktionen auf? Welche Faktoren spielen eine entscheidende Rolle für die CO<sub>2</sub>-Emissionen? Welchen Einfluss haben exponierte Lehmgebäude auf das Innenraumklima und welche Möglichkeiten ergeben sich damit passive Betriebsstrategien zu verfolgen?

Bereits im Bericht zu Alnatura I wurde aufgezeigt welchen positiven Einfluss die Verwendung von Lehm auf die Ökobilanz haben kann. Im Rahmen der Untersuchungen explizit zum Bau der Alnatura-Arbeitswelt wurde festgestellt, dass der Transport einen signifikanten Einfluss auf die Ökobilanz haben kann. Die geringe CO<sub>2</sub>-Emission in der Herstellung der Fassade kann schnell aufgewogen werden, wenn der Rohstoff nicht aus unmittelbarer Nähe bezogen werden kann.

Der zweischalige Aufbau der Lehmfassade führt dazu, dass die Lehmwände zum Raum hin exponiert sind. Der Einfluss auf Feuchte durch natürliche Feuchteregulierung des Lehms, sowie der Einfluss auf die Raumtemperatur wurde durch Lufttemperatur und -feuchtesensoren im gesamten Gebäude untersucht. Die thermischen Bedingungen im Jahr 2019 waren im erwarteten Bereich. In der Planung wurden erweiterte Temperaturzielbereiche zu Gunsten einer reduzierten Technisierung definiert. Trotz geringer Kühlkapazitäten können Raumtemperaturen 10 K unter der Außentemperatur erreicht werden. Die Messungen der Luftfeuchte zeigen eine signifikante Dämpfung und Verzögerung von Spitzen.

Insgesamt wurden anhand dieses Forschungsprojekts wichtige Erkenntnisse zum erfolgreichen Einsatz von Lehm im Verwaltungsbau mit geringem Technisierungsgrad gewonnen. Aufgrund der Pandemie konnten ab März 2020 keine repräsentativen Daten für den Normalbetrieb aufgenommen werden. Dieser Umstand und Probleme in der Steuerungs- und Regelungstechnik führen dazu, dass weiterhin Optimierungspotenziale vorhanden sind, die es auszuschöpfen gilt.

# Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Gewerbebauten in Lehm und Holz - Mehrwert durch Material, München: Detail Business Information GmbH, 2020.
- [2] Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG); Verfasser Serge Mattli, Sebastian Klauz, Iwan Plüss, Urs-Peter Menti, August 2010.
- [3] Abramjuk M, Puschel D, Umweltgerechte Baustoffe. Graue Energie und Nachhaltigkeit von Gebäuden., Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [4] Campus 360 GmbH, "Entwicklung von Strategien zur Implementierung des grauen Energieaufwands in den interativen integrierten Entwurfsprozess von Gebäuden", Abschlussbericht des Forschungsprojektes AZ: 32312701-25 von der Deutschen Bundesumweltstiftung, Dezember 2015.
- [5] Duden, <http://www.duden.de/>, zuletzt aufgerufen am 16.08.2016.
- [6] <http://www.rathscheck.de/info/138/Service/Presse/Pressearchiv/Pressemitteilungen-2011/Erste-Umwelt-Produktdeklaration-EPD.html>, zuletzt aufgerufen am 16.08.16.
- [7] Alnatura-Leitsätze, "Die Identität der Firma Alnatura soll bei allen Bauten angemessen zum Ausdruck gebracht werden".
- [8] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Leitfaden Nachhaltiges Bauen - Zukunftfähiges Planen, Bauen, Betreiben von Gebäuden, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Februar 2016.
- [9] Ökobaudat, "Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (BMI)," 2017. [Online]. Available: <http://www.oekobaudat.de/> .
- [10] <http://www.oekobaudat.de/>, zuletzt aufgerufen am 18.08.16.
- [11] <http://www.nachhaltigesbauen.de/>, zuletzt aufgerufen am 01.09.2016.

- [12] ecobine.de, zuletzt aufgerufen am 01.09.2016.
- [13] X-Floc, Datenblatt Einblasmaschine Zellofant M95, [www.x-floc.com](http://www.x-floc.com), zuletzt aufgerufen am 01.09.2016.
- [14] L. Nanz, M. Rauch, T. Honermann und T. Auer, „Impacts on the Embodied Energy of Rammed Earth Facades During Production and Construction Stages,“ *Journal of Facade Design & Engineering*, pp. 75-88, 2019.
- [15] DIN18599-1, „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger,“ 2016.
- [16] R. Frischknecht, M. Stucki, K. Flury, R. Itten und M. Tuchschnid, „Primärenergiefaktoren von Energiesystemen,“ ESU-services GmbH, Uster, 2012.
- [17] U. Schneider, M. Böck, H. Mötzl und e. al, „recyclingfähig konstruieren,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2010.
- [18] DIN 1946-6, *Raumlufttechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*, 2019-12-00, Deutsches Institut für Normung.
- [19] DIN EN 15251 (zurückgezogen), *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, 2012-12, Deutsches Institut für Normung.
- [20] DIN EN 13779, *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme*, 2007-09, Deutsches Institut für Normung.
- [21] B. Schlomann, K. Wohlfarth, H. Kleeberger, L. Hardi, B. Geiger, A. Pich, E. Gruber, A. Gerspacher, E. Holländer und A. Roser, „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und

Energie (BMWi). Anschlussauftrag des Forschungsvorhabens 53/09,“ Fraunhofer ISI, IfE, GfK, IREES, Karlsruhe, München, Nürnberg, 2015.

- [22] Institut Wohnen und Umwelt GmbH, „Teilenergiekennwerte – Neue Wege in der Energieanalyse von Nichtwohngebäuden im Bestand,“ Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, 2014.
- [23] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- [24] G. Hausladen, T. Auer, J. Schneegangs, K. Klimke, H. Riemer, B. Trojer, L. Qian und M. de Borja Torrejón, „Lastverhalten von Gebäuden unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014.
- [25] o.V., „Klimafaktoren (KF) für Energieverbrauchsangabe,“ Deutscher Wetterdienst (DWD), [Online]. Available: <http://www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren.html>. [Zugriff am 24 Mai 2015].
- [26] *DIN EN 15251:2007-08. Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.*
- [27] L. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, „Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterte Auflage,“ IWU, Darmstadt, 2015.
- [28] o.V., „Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 16/2011,“ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2011.
- [29] Frauke Oldewurtel, „Stochastic Model Predictive Control for Energy Efficient Building Climate Control,“ ETH, Zürich, 2011.
- [30] Markus Gwerder, Frauke Oldewurtel, Beat Lehmann, Katharina Wirth, Vanessa Stauch und Carina Sagerschnig, „Prädiktive Gebäuderegulung mithilfe von

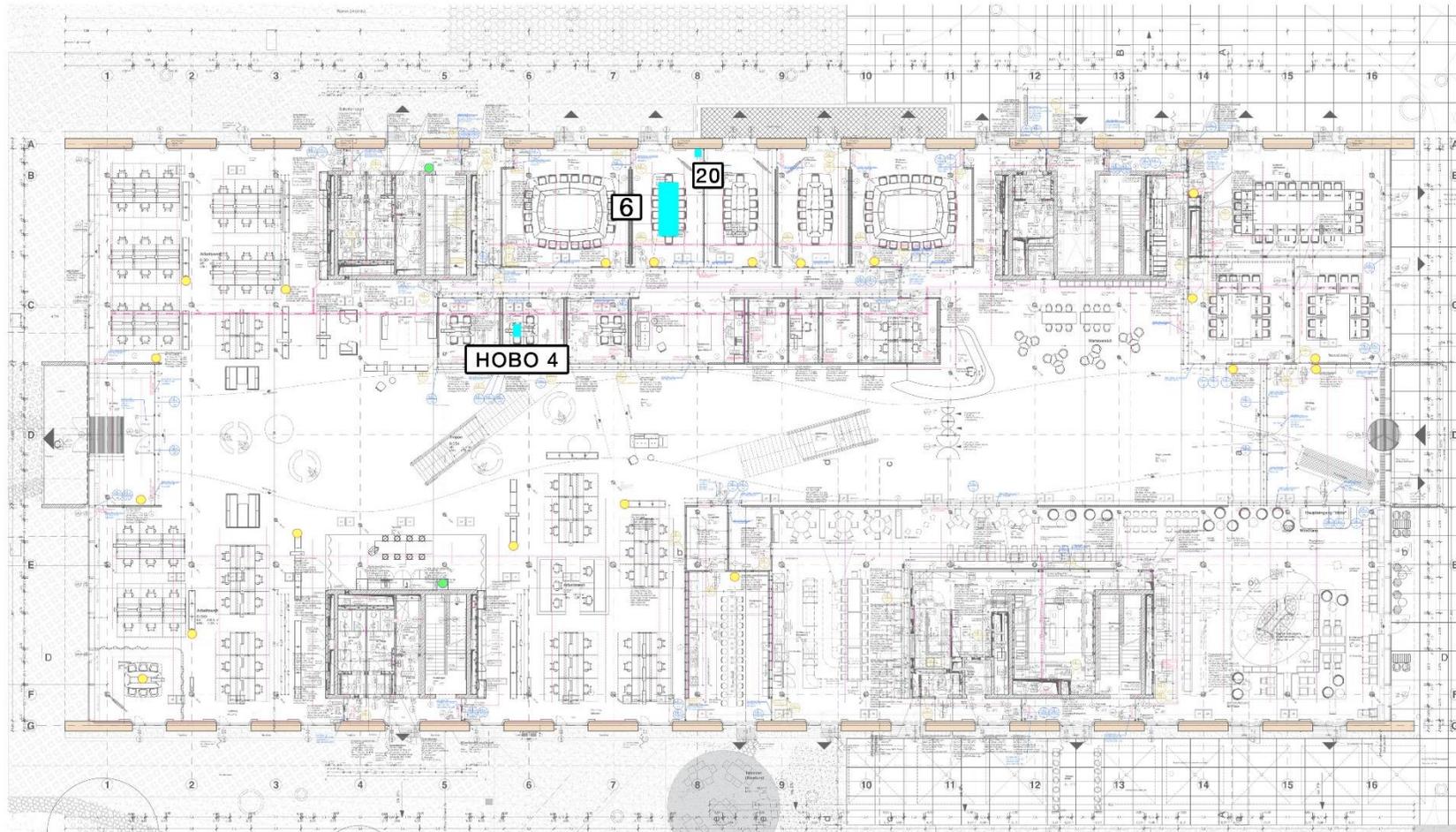
Wetter- und Anwesenheitsvorhersagen: Resultate des Projekts OptiControl,“ in  
16. Status-Seminar Energie- und Umweltforschung im Bauwesen, 2010.

- [31] o.V., „Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen. Fachserie 5. Reihe 3.“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015.
- [32] K. Bettgenhäuser, T. Boermans, M. Offermann, A. Krechting, D. Becker, M. Kahles, F. Pause und T. Müller, „Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2011.
- [33] o.V., „Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Nichtwohngebäuden (Neubau) Lange Reihen z. T. ab 1980.“ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015.
- [34] N. Diefenbach, „Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Deutscher Gebäudebestand: Basisdaten und Modellrechnungen bis 2020,“ o.J.. [Online]. Available: [http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/ake44/IWU-Tagung\\_17-04-2008\\_-\\_Diefenbach\\_-\\_Basisdaten.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/ake44/IWU-Tagung_17-04-2008_-_Diefenbach_-_Basisdaten.pdf). [Zugriff am 18 November 2015].
- [35] ECOfYS; Prognos, „Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strom und zur Netzintegration erneuerbarer Energien,“ 2011.
- [36] o.V., „et Zeitschrift für Energiewirtschaft-Recht-Technik und Umwelt,“ November 2013. [Online]. Available: <http://www.et-energie-online.de/Aktuelles/Veranstaltungen/tabid/67/Year/2013/Month/11/NewsModule/450/NewsId/781/Klasse-statt-Masse-Die-politischen-Ziele-der-Gebaudesanie- rung-in-Deutschland.aspx>. [Zugriff am 18 November 2015].
- [37] J. Nietsch, T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. L. de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt, M. Sterner, T. Trost, A. von Oehsen, R. Schwinn, C. Pape, H. Hahn, M. Wickert und B. Wenzel, „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global,“ Stuttgart, 2012.
- [38] P. Kuhn, M. Kühne und C. Heilek, „Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher,“ KW21 - Kraftwerke des 21. Jahrhunderts, München, 2012.

- [39] H.-J. Ziesing, C. Rohde, H. Kleeberger, P. Tzscheutschler, B. Geiger, M. Frondel und N. Ritter, „Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012,“ AG Energiebilanzen e.V., Berlin, 2013.
- [40] C. Heilek, „Modellgestützte Optimierung des Neubaus und Einsatzes von Erzeugungsanlagen und Speichern für elektrische und thermische Energie im deutschen Energiesystem,“ Dissertation, TU München, 2015.
- [41] J. Jungwirth, „Lastmanagement in Gebäuden Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden,“ Dissertation, TU München, 2014.
- [42] P. Kuhn, „Iteratives Modell zur Optimierung von Speicherausbau und -betrieb in einem Stromsystem mit zunehmend fluktuierender Erzeugung,“ Dissertation, TU München, 2012.
- [43] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Ein Strommarkt für die Energiewende - Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch),“ Berlin, 2015.
- [44] DIN EN 15604, "Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Pröduktkategorie Bauprodukte", Deutsches Institut für Normierung e.V., Juli 2014.
- [45] Herstellerangaben Soluxtec nach Solstyce, internes Dokument.
- [46] V. Quaschnig, <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php>, zuletzt aufgerufen am 07.07.16 .
- [47] Initiative Ziegel, *Initiative Ziegel im Fachverband der Stein- und keramischen Industrie Österreich*, Wiedner Hauptstraße 63, 1045 Wien : [www.ziegel.at](http://www.ziegel.at) , 2015.
- [48] ÖNORM EN 771-1, "Festlegung von Mauersteinen," 2005.
- [49] ÖNORM EN 15037-3, "Betonfertigteile-Balkendecken mit Zwischenabuteilen-Teil 3: Keramische Zwischenbauteile," 2001.
- [50] D. Kellenberger and H.-J. Althaus, "Relevance of simplifications in LCA of building components," *Building and Environment* 44(2009) 818-825, June 2008.

- [51] A. Binz, M. Erb and G. Lehmann, Ökologische Nachhaltigkeit im Wohnungsbau; eine Bewertung von Erneuerungsstrategie Muttenz, Fachhochschule Basel, 2000.
- [52] AG Mauerziegel, "Owner of dataset in Ökobaudat Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.," 2015. [Online]. Available: [http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f98eea66-671c-4014-bfbb-2db1ffba8331&stock=OBD\\_2017\\_I&lang=de](http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f98eea66-671c-4014-bfbb-2db1ffba8331&stock=OBD_2017_I&lang=de).
- [53] S. Mattli, S. Klauz, I. Plüss and U.-P. Menti, "Wohnhaus Rauch - Lehmhaus - Studie bezüglich Grauer Energie, Heizenergie und Komfort bei einem Lehmhaus," Lucerne University of Applied Science and Arts, 2010.
- [54] M. Bayer, „Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Wahl geeigneter Baumaterialien für ressourcenschonende Neubauten,“ Masterthesis, München, 2017.

# Anhang Pläne



- TEMPERATURFÜHLER (GLT)
- IC METER
- CO2-FÜHLER (GLT)

Abbildung 123: Lage GLT-Sensoren und IC-Meter EG

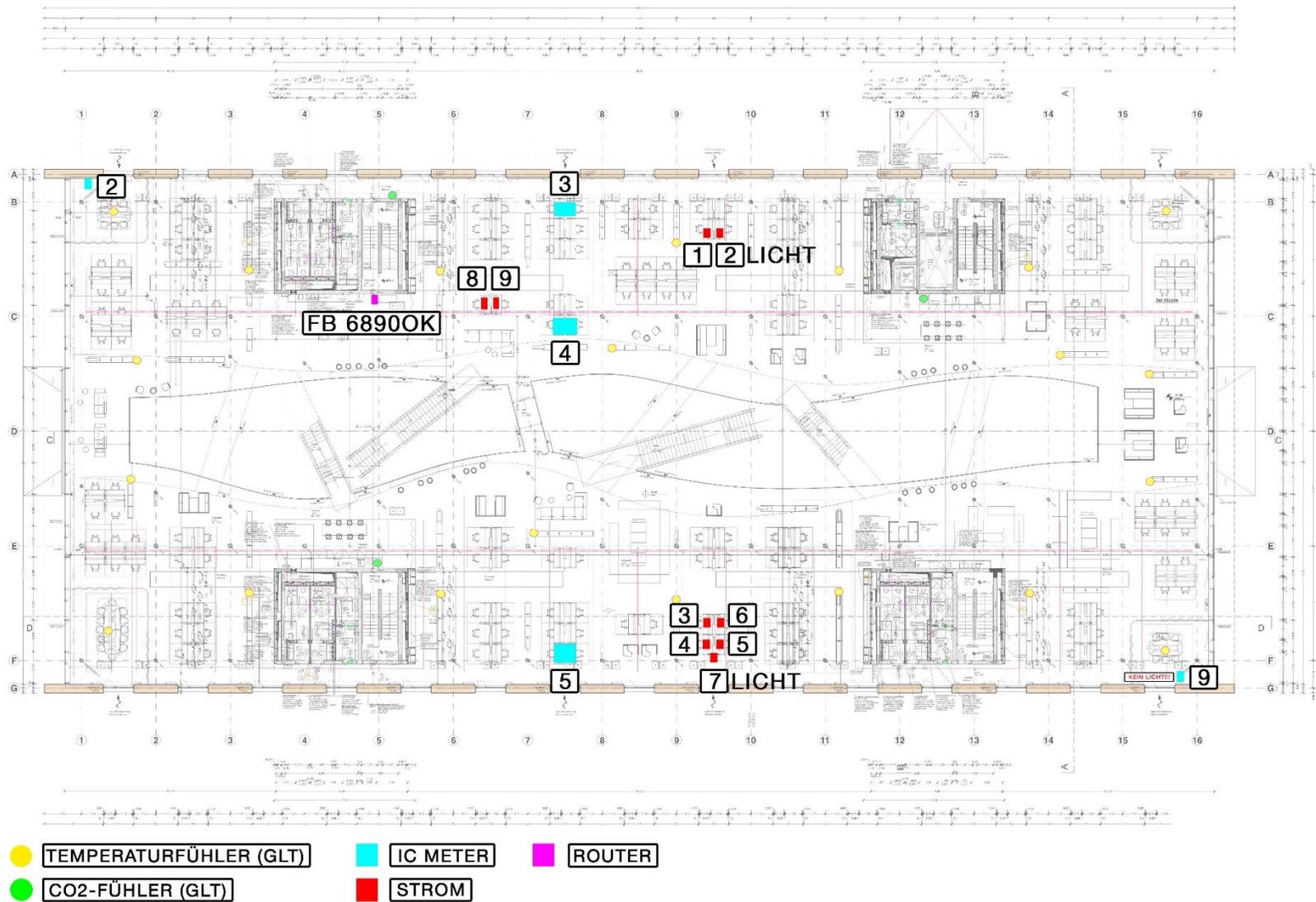


Abbildung 124: Lage GLT-Sensoren und IC-Meter OG1

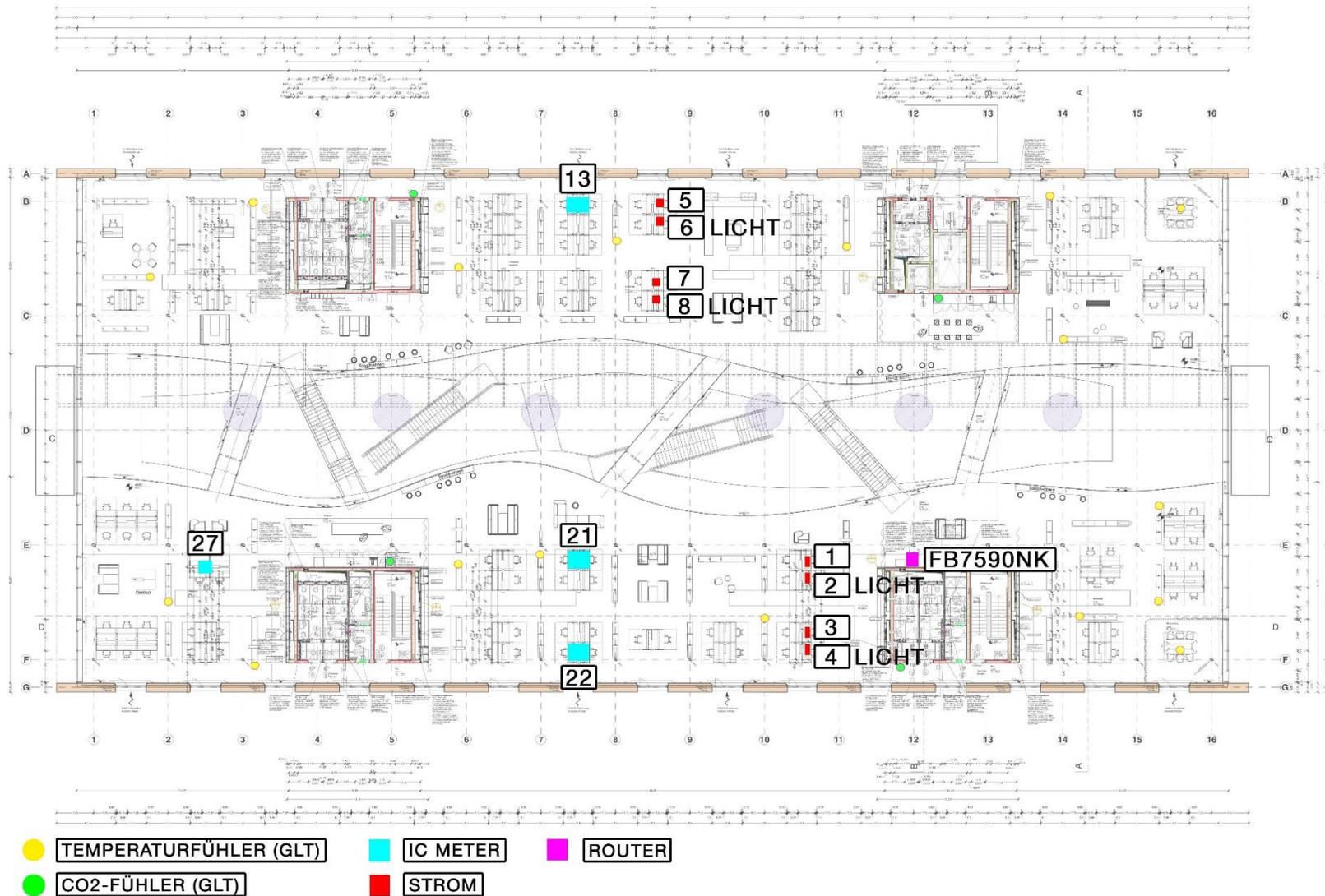


Abbildung 125: Lage GLT-Sensoren und IC-Meter OG2