

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

FERD. TAUSENDPFUND

Lebenszyklusanalyse und Gebäudemonitoring

DER BAYERISCHE BAUINDUSTRIEVERBAND E.V.

- Wirtschaftsverband
- Tarifpartner
- Bildungsträger
- Informationen für den Bau

Der Bayerische Bauindustrieverband ist mit all seinen Leistungen seinen Mitgliedern verpflichtet. Dazu gehören eine umfassende Information und Beratung der Mitgliedsfirmen in politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Fragen, die Sicherung branchenspezifischer Aus- und Weiterbildung, die Verhandlung von Tarifverträgen, die Schaffung einer Plattform zum Erfahrungsaustausch zwischen den Unternehmen der Bauindustrie und die Förderung von Innovationen in Forschung und Entwicklung.

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

**FERD.
TAUSEND
PFUND**

INHALT

VORWORT	5
Abkürzungsverzeichnis und verwendete Einheiten.....	6
EINFÜHRUNG	7
PROJEKT UND GEBÄUDEVORSTELLUNG	8
2.1. Allgemeine Angaben zum Projekt.....	8
2.2. Baukonstruktion.....	9
LEBENSZYKLUSANALYSE	13
3.1. Grundlagen und Berechnungsweise.....	13
3.2. Ergebnisse Außenwand-Vergleich.....	15
GEBÄUDEMONITORING	22
4.1. Messkonzept.....	22
4.2. Außenklima.....	25
4.3. Ergebnisse Energieverbrauch.....	26
4.4. Ergebnisse Raumklima.....	28
4.4.1. Temperatur Jahresverlauf.....	29
4.4.2. Bewertung des Raumklimas.....	29
4.4.3. Sommerliche Überhitzung.....	32
4.5. Ergebnisse Wärmestrom.....	33
ZUSAMMENFASSUNG /FAZIT	38
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	40
TABELLENVERZEICHNIS	42

VORWORT

Der wachsende Bedarf an Wohn- und Arbeitsraum ist insbesondere in den bayrischen Städten und Metropolregionen besonders hoch. Diese sind seit längerem begehrte Wohn- und Arbeitsorte. Zusammen mit dem steigenden Bewusstsein für eine nachhaltige gesellschaftspolitische Entwicklung ergeben sich neue und spannende Herausforderungen im Themenkomplex der nachhaltigen Entwicklung im Baugewerbe. Um diese Herausforderungen zu meistern bedarf es einer interdisziplinären und eng verzahnten Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Baupraxis. Dabei werden wissenschaftlich ausgearbeitete, innovative Methoden in die Baupraxis übertragen und bereits in der Planung von Sanierungs- und Neubauvorhaben diskutiert und umgesetzt. Dabei ist der lebenszyklusbasierte Bewertungsansatz zentrales Element der Entwicklung und Erarbeitung der genannten Methoden, die von der Analyse der Lebenszykluskosten, über das Monitoring des Nutzerverhaltens sowie der energetischen Performance, bis zur lebenszyklusbasierten ökologischen Analyse des Gebäudes reicht.

Dadurch werden praxistaugliche und umsetzbare Strategien für die Realisierung der nachhaltigen Entwicklung im Baugewerbe erarbeitet und deren Anwendung an konkreten Fallbeispielen präsentiert. Bauherren, Städte und Kommunen werden für den Umgang mit dem Themenkomplex der nachhaltigen Entwicklung sensibilisiert und bekommen zudem konkrete Strategien zu dessen Umsetzung an die Hand.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts erarbeitete die Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München, der Ferdinand Tausendpfund GmbH & Co. KG und dem Bayerischen Bauindustrieverband, ein Konzept zur lebenszyklusbasierten Analyse sowie einem Monitoring-Konzept zur Bewertung der lebenszyklusbasierten energetischen und ökologischen Performance des Gebäudes. Das 2016 errichtete Neubau Bürogebäude der Ferdinand Tausendpfund GmbH & Co. KG dient dabei als konkretes Forschungsobjekt.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS UND VERWENDETE EINHEITEN

EG	Erdgeschoss
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
K	Kelvin
Kg CO ₂ -Äq.	Kilogramm Kohlendioxid-Äquivalente
MDF	Medium Density Fibreboard
MW	Mineralwolle
OG	Obergeschoss
OSB	Oriented Strand Board
PP	Polypropylen
W	Watt
kW/m ²	Kilowatt pro Quadratmeter (Wärmestrom)
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
SQL	Datenbanksprache (engl. Sequence Query Language)

I. EINFÜHRUNG

Die zunehmende Bedeutung von Umweltaspekten führt, speziell auch im Bau- und Immobilienwesen sowie bei der Eigen- und Fremdnutzung zu einer verstärkten Nachfrage von nachhaltig geplanten, errichteten und betriebenen Gebäuden. Neben dem zunehmenden ökologischen Bewusstsein spielen der kostengünstige Betrieb und steigende Komfortbedürfnisse, bei der Kauf- oder Mietentscheidung für eine Immobilie, eine immer größer werdende Rolle.

¹In diesem Bericht wird die Bezeichnung FT für die Bauunternehmung Ferdinand Tausendpfund GmbH & Co. KG verwendet.

Mit dem Bauprojekt „Ferd. Tausendpfund: FTmehrHaus“ der Bauunternehmung Ferdinand Tausendpfund GmbH & Co. KG¹ wurde ein innovatives 3-geschossiges Bürogebäude, mit rund 1.200 m² Brutto-Grundfläche, errichtet. Dabei wurden die Außenwände der drei Geschosse in verschiedenen Massivbauweisen realisiert: das Erdgeschoss in Stahlbeton, das 1. Obergeschoss in Wärmedämmziegel und das 2. Obergeschoss in Kalksandstein.

Bei der Planung, Umsetzung und Durchsetzung des Projekts fanden unterschiedliche Nachhaltigkeitskriterien Berücksichtigung, die unter anderem folgende Mehrwerte generieren:

- Hohe Behaglichkeit und hoher Komfort
- Hohe Nutzerakzeptanz
- Geringe Betriebs-, und Instandsetzungskosten
- Zukunftsfähigkeit
- Positive öffentliche Wahrnehmung
- Gute Vermarktung des Objekts

Durch die Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München wurde in Bezug auf das Bauprojekt eine ganzheitlicher Analyse- und Bewertungsansatz erarbeitet und entwickelt. Ziel des Projekts war dabei die Entwicklung eines integrativen Gesamtkonzepts zur Schaffung eines Bürogebäudes im KfW-Effizienzhaus 55-Standard, nach EnEV 2014 (ab 01.01.2016), unter Verwendung unterschiedlicher Massivbauweisen und Lowtech-Lösungen. Dabei haben die Themen „Realisierung hoher Aufenthaltsqualität/Behaglichkeit“ sowie „Ökobilanz“ Vorrang. Letztlich soll dargestellt werden, welche der drei unterschiedlichen, geschossweise verwendeten Massivbauweisen diese Ziele bestmöglich erfüllt.

Durch das interdisziplinäre Team der Technischen Universität München und das langjährige Know-how der FT in der Umsetzung verschiedenster Bauprojekte, konnten die unterschiedlichen Themenbereiche mit ihren Fragestellungen gebäude-, energie-, kosten- sowie ressourcenbezogenen Fragestellungen, integrativ bearbeitet werden.

II. PROJEKT UND GEBÄUDEVORSTELLUNG

2.1. ALLGEMEINE ANGABEN ZUM PROJEKT

Bei dem Gebäude in der Bukarester Straße 1c in Regensburg handelt es sich um ein Ende des Jahres 2016 neu errichtetes Bürogebäude, welches aus drei verschiedenen Außenwandkonstruktionen besteht. Das Gebäude verfügt über ein Erdgeschoss sowie zwei Obergeschosse. Das Gebäude ist nicht unterkellert, weswegen die Bodenplatte, die Außenwände sowie das Dach die thermische Gebäudehülle bilden. Im Gebäude selbst werden alle Zonen als auf normale Temperaturen beheizte Bereiche angesehen.



Abbildung 1 Der Neubau Bürogebäude Tausendpfund (Fotoquelle: © Bauer | bauerwerner.com)

Für das vorliegende Bauvorhaben wurden folgende relevante Bezugsgrößen aus dem Nachweis gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) entnommen:

- Fläche der thermischen Gebäudehülle: $A = 1.720 \text{ m}^2$
- Bruttovolumen: $V_e = 4.246 \text{ m}^3$
- Luftvolumen: $V = 3.397 \text{ m}^3$
- Nettogrundfläche: $ANGF = 1.097 \text{ m}^2$
- Fensterflächenanteil: ca. 33 %
- A/V_e -Verhältnis: $A/V_e = 0,41 \text{ m}^{-1}$

2.2. BAUKONSTRUKTION



Abbildung 2 Die verschiedenen tragenden Materialien der Außenwände
(Fotoquelle: © Bauer | bauerwerner.com)

Die Außenwände des Gebäudes sind geschossweise in drei unterschiedlichen Massivbauweisen errichtet (siehe Abbildung 2). Das tragende Material ist im Erdgeschoss Stahlbeton, im 1. OG Wärmedämmziegel und im 2. OG Kalksandstein. Zusätzlich kommt ein Wärmedämmverbundsystem als Außendämmung bei den Außenwänden zum Einsatz. Dabei kommen die drei Außenwandkonstruktionen jeweils auf annäherungsweise denselben Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$, um den KfW55-Standard zu erfüllen. Die Bodenplatte, die Geschossdecken, die tragenden Innenwände und die Dachplatte sind aus Stahlbeton errichtet. Die folgenden Bauteilaufbauten zeigen die Schichten von innen nach außen.

TABELLE 1 BAUTEILAUFBAUTEN PER WERKPLANUNG
AUSSENWAND EG: U-WERT: $0,18 \text{ [W/M}^2\text{K]}$

Baustoff	Dicke [m]	Lambda [$\text{W/m}^2\text{K}$]	Dichte [kg/m^3]
Innenputz	0,02	0,7	1400
Stahlbeton	0,18	2,3	2300
Wärmedämmung (EPS)	0,18	0,035	25
Außenputz	0,02	0,7	1400
Summe	0,40		

AUSSENWAND 1.OG: U-WERT: 0,18 [W/M²K]

Baustoff	Dicke [m]	Lambda [W/m²K]	Dichte [kg/m³]
Innenputz	0,02	0,7	1400
Wärmedämmziegel	0,30	0,09	650
Wärmedämmung (EPS)	0,06	0,035	25
Außenputz	0,02	0,7	1400
Summe	0,40		

AUSSENWAND 2.OG: U-WERT: 0,18 [W/M²K]

Baustoff	Dicke [m]	Lambda [W/m²K]	Dichte [kg/m³]
Innenputz	0,02	0,7	1400
Kalksandstein	0,175	1,4	2000
Wärmedämmung (EPS)	0,18	0,035	25
Außenputz	0,02	0,7	1400
Summe	0,395		

Fenster: Uw-Wert: 0,87 [W/m²K]**Bezeichnung**

Glas 3-Scheiben Wärmeschutzverglasung Ug-Wert = 0,6 W/m²K
Rahmen Kunststoff Uf-Wert = 1,25 W/m²K

BODENPLATTE: U-WERT 0,19 [W/M²K]

Baustoff	Dicke [m]	Lambda [W/m²K]	Dichte [kg/m³]
Belag: Teppich bzw. Fliesen			
Zement-Estrich (Heizestrich)	0,08	1,4	2000
Trittschall- und Wärmedämmung (EPS)	0,06	0,04	25
Abdichtung (Bitumen)			
Stahlbeton	0,20	2,3	2300
Perimeterdämmung (XPS)	0,12	0,035	25
Summe	0,46		

DACHPLATTE: U-WERT: 0,15 [W/M²K]

Baustoff	Dicke [m]	Lambda [W/m²K]	Dichte [kg/m³]
Innenputz	0,02	0,7	1400
Stahlbeton	0,25	2,3	2300
Dampfsperre: Bitumen			
Wärmedämmung (EPS)	0,23	0,035	25
Dachabdichtung: Bitumen			
Perimeterdämmung (XPS)	0,12	0,035	25
Summe	0,50		

2.3. TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG

Ziel des energetischen Versorgungsystems ist es zum einen, den Energiebedarf so gering wie möglich zu halten, und zum anderen die Verwendung von erneuerbaren Energien zu forcieren. Die Wärme- und Kälteübergabe erfolgt im gesamten Gebäude über eine Fußbodenheizung. Der entscheidende Vorteil besteht aus den erforderlichen geringen Vor- und Rücklauftemperaturen ca. 35 °C / 28 °C gegenüber herkömmlichen Radiatoren ca. 55 °C / 45 °C. Aus diesem Grund kann der Wärme- und Kühlenergiebedarf über eine effiziente Luft-Wasser-Wärmepumpe gedeckt werden. Die Wärmepumpe nutzt dabei die in der Außenluft enthaltene Energie. Des Weiteren verfügt das Gebäude über eine Photovoltaikanlage mit insgesamt ca. 23,5 kWp. Um den Eigennutzungsanteil an Strom² zu erhöhen wurde die Ausrichtung der Photovoltaikmodule dem für Bürogebäude typischen Lastgang des Strombedarfs, angepasst. Da in Büros üblicherweise vormittags und abends Strom für die Beleuchtung benötigt wird, wurden die Photovoltaikmodule in einer Ost-West Ausrichtung aufgestellt. So kann während dieser Zeit ein höherer Eigennutzungsanteil erreicht werden.

²Eigennutzungsanteil: Ist der Anteil am jährlich erzeugten Strom, den das Gebäude direkt nutzt.

Zur Vermeidung der sommerlichen Überhitzung verfügt das Gebäude über außenliegende und automatisch gesteuerte Lamellen-Raffstores. Diese werden anhand der gemessenen Strahlung der Wetterstation auf dem Dach gesteuert. Bei Bedarf kann der Nutzer den Sonnenschutz jedoch seinen individuellen Bedürfnissen anpassen. Eine Lüftungsanlage wurde im Gebäude aufgrund der Inversionswetterlage und den dabei einhergehenden hohen Feinstaubkonzentrationen sowie der fehlenden nächtlichen Abkühlung nicht realisiert.

Im Folgenden ist die eingesetzte Anlagentechnik zusammengefasst

Heizung / Kühlung

- Heizungsanlage: Luft-Wasser-Wärmepumpe mit 45 kW
- Wärmeübergabe: Fußbodenheizung, Systemtemperaturen 35 °C / 28 °C
- Speicher: Volumen 900 l

Beleuchtung

- Beleuchtungsart: Direkt & Indirekt
- Lampenart: LED-Leuchten
- Kontrolle: Manuell

Photovoltaik

- 23,5 kWp

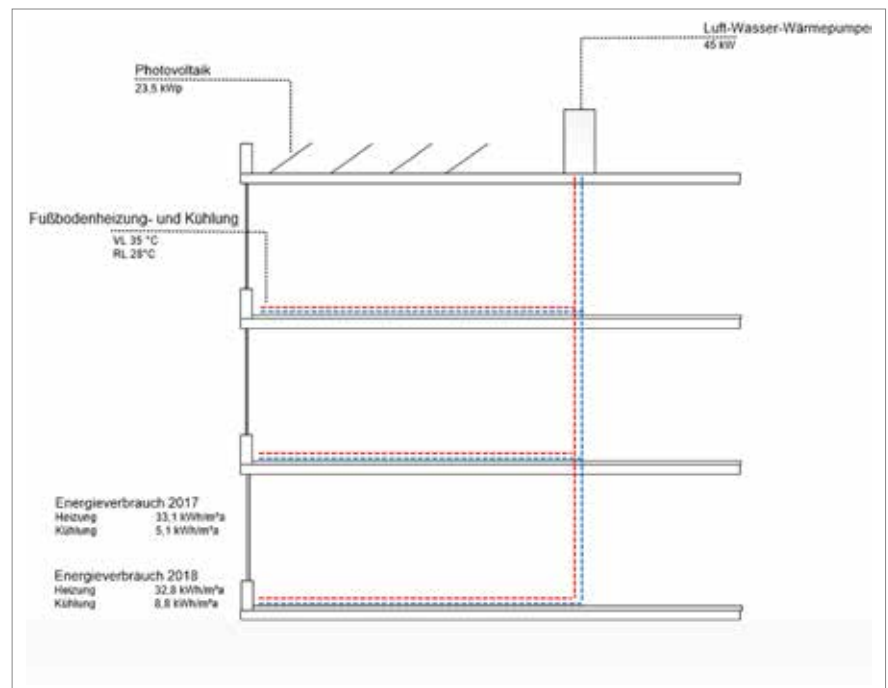


Abbildung 3 Schematische Darstellung der gebäudetechnischen Anlagen und deren Kennwerte (eigene Darstellung TU München)

III. LEBENSZYKLUSANALYSE

3.1. GRUNDLAGEN UND BERECHNUNGSWEISE

Die Ökobilanz (Englisch „Life Cycle Assessment“, LCA) hat sich als die Methode etabliert, die ein Produkt oder eine Dienstleistung über ihren gesamten Lebenszyklus auf ihre ökologische Qualität hin untersucht. Ein Gebäude ist das Ergebnis aus dem Zusammenfügen verschiedenster Produkte und Dienstleistungen, d.h. eine Gebäude-Ökobilanzierung setzt sich aus vielen Ökobilanzierungen für die Gebäude-Bestandteile zusammen. Im Rahmen einer Ökobilanz kann man gesamte Gebäude von der Gewinnung der Rohstoffe bis zum Recycling der Baustoffe untersuchen oder auch nur einzelne Gebäudeteile, wie zum Beispiel eine Außenwand. Grundlagen für die Gebäude-Ökobilanz legen unter anderem folgende Normen fest:

- DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen; Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2009-11
- DIN EN 15804:2014-07 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013
- DIN EN 15978:2012-10 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011

Der Lebenszyklus von Gebäuden wird in 17 Phasen eingeteilt, wie in Abbildung 4 dargestellt. Nicht alle dieser Lebenszyklusphasen werden derzeit für Berechnungen mit einbezogen, da einige dieser Phasen sehr projektspezifisch sind, so dass keine allgemeinen Daten verwendet werden können. Für das vorliegende Projekt wurde im Unterschied zur üblichen Berechnungsweise die Phase A4 (Transport) mit einbezogen, da die Tausendpfund GmbH Informationen zu den Transportdistanzen der einzelnen Baustoffe zur Verfügung stellen konnte.

Für den Neubau Ferd. Tausendpfund: FTmehrHaus wurde eine vergleichende Ökobilanz der verschiedenen Außenwände des Gebäudes berechnet, ergänzt durch eine nicht realisierte Holzrahmenbauwand. Alle Massiv-Außenwände haben den gleichen U-Wert ($0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$, vgl. Kapitel 2.2), so dass man die Nutzungsphase aus dem Vergleich ausklammern kann, da sie für alle Wände gleich wäre. Allein die Holzrahmenbauwand (siehe Tabelle 2) hat aus konstruktiven Gründen einen etwas besseren U-Wert ($0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$). Für den Vergleich bedeutet das, dass diese Wand im Vergleich zu den Wänden mit geringerem U-Wert gegebenenfalls Betriebsenergie spart. Insofern könnte ein etwas höherer Energiebedarf in anderen Lebenszyklusphasen, zum Beispiel für die Herstellung der Dämmung, gerechtfertigt sein, wenn sich der erhöhte Energieeinsatz durch Einsparung im Gebäudebetrieb amortisiert.

DIN 15978:2012-10			Begriffe aus der Praxis	Vorteile FTmehrHaus		
Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen	Herstellungsphase	A1	Rohstoff Beschaffung	Gewinnung und Aufbereitung	Materialwahl und Gestaltung ausgelegt auf Haltbarkeit, Wiederverwendung und Rückgewinnung	
		A2	Transport	Beförderung		
		A3	Produktion	Verarbeitung		
	Errichtungsphase	A4	Transport	Beförderung		Materialwahl und Gestaltung ausgelegt auf Haltbarkeit, Wiederverwendung und Rückgewinnung
		A5	Errichtung / Einbau			
	Nutzungsphase	B1	Nutzung			FTmehrHaus kann zu Wohn- und Geschäftshaus oder Büro- und Geschäftshaus umgenutzt werden
		B2	Instandhaltung			
		B3	Instandsetzung	Rückführung in funktionsfähigen Zustand		
		B4	Austausch			
		B5	Modernisierung	Verbesserung bzw. Änderung		
	Entsorgungsphase	C1	Abbruch			Materialwahl und Gestaltung ausgelegt auf Haltbarkeit, Wiederverwendung und Rückgewinnung
		C2	Transport	Beförderung		
C3		Abfallbewirtschaftung	Sammlung und Behandlung			
C4		Deponierung	Beseitigung (Entsorgung)			
		D	Potential für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling			

- Für das DGNB System (Büro- und Verwaltungsbauten 2015) in die Ökobilanz einzubeziehen
- Für die Ökobilanz des FTmehrHaus zusätzlich mit einbezogen (Außenwandvergleich)
- Für die Ökobilanz des FTmehrHaus zusätzlich möglich mit einzubeziehen (Gesamtgebäude)

Abbildung 4 Lebenszyklusphasen von Gebäuden (Darstellung basierend auf DIN EN ISO 15978:2012, DIN ISO 21500:2016, DIN EN ISO 41011:2019, BGB:2017, BayBO:2018, KrWG:2017, DIN 31051:2003, DIN 18960:2008, BRW-RL:2011, HOAI:2013, VOB/A:2016, WZ2008)

**TABELLE 2: BAUTEILAUFBAU HOLZRAHMENBAUWAND
VERGLEICHSWAND HOLZRAHMENBAU: U-WERT: 0,16 [W/M²K]**

Baustoff	Dicke [m]	Lambda [W/m²K]	Dichte [kg/m³]
Gipskarton (2-lagig)	0,025	0,25	800
Holzständer und Wärmedämmung (Mineralwolle) (Installationsebene)	0,06	0,13 0,035	493 (Holz) 26 (MW)
OSB-Platte	0,015	0,13	600
Holzständer und Wärmedämmung (Zellulose)	0,20	0,13 0,04	493 (Holz) 45 (Zellulose)
MDF-Platte	0,15	0,09	700
Unterspannbahn PP	0,002		732
Holzlatzen (Hinterlüftung)	0,038		493
Faserzement-Platten	0,01		26
Summe	0,365		

Zunächst wurde eine Massenbilanz aller verbauten Baustoffe pro m² Außenwand aufgestellt. Aus dieser Massenaufstellung kann man mit Hilfe einer Datenbank den Energiebedarf und die potenziellen Umweltwirkungen für Herstellung, Transport und Entsorgung bzw. Recycling berechnen. Die Ökobaudat 2016-I war Datengrundlage für die Berechnung. Der Vergleich konzentriert sich auf die Indikatoren Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) und Treibhauspotenzial, da das Bauwesen für den Energiebedarf und den Treibhauseffekt eine große Rolle spielt. Die anderen Indikatoren der Ökobaudat (Ozonabbau-, Ozonbildungs-, Versauerungs-, Überdüngungspotenzial, sowie Abbaupotenzial abiotischer nicht fossiler Rohstoffe und fossiler Brennstoffe) wurden berechnet, für den Vergleich aber nicht herangezogen.

3.2. ERGEBNISSE AUSSENWAND-VERGLEICH

Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial wurden jeweils für einen Quadratmeter Ansichtsfläche der Außenwand berechnet. Eine Gesamtübersicht (Abbildung 5) zeigt die Massenbilanz für die einzelnen Wände und die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Konstruktionsweisen. Gezeigt ist die Treibhausgasemission bei der Herstellung von einem Quadratmeter Wand. Hier sieht man, dass die Herstellung der Stahlbetonwand am meisten Treibhausgas ausstößt ca. 82 kg, gefolgt von der Kalksandsteinwand ca. 70 kg und der Ziegelwand ca. 60 kg. Die Holzständerwand erhält eine Gutschrift ca. - 40 kg, da das Holz beim Wachstum Treibhausgas durch Photosynthese umwandelt und so einspeichert. Über den gesamten Lebenszyklus, d.h. inklusive Austausch des WDVS und Beseitigung von Material (die Werte für potentielle Gutschriften für Recycling bzw. energetische Verwertung der Phase D sind in Klammern angegeben), emittiert die Stahlbetonwand 134 kg (122 kg), die Kalksandsteinwand 124 kg (116 kg), die Ziegelwand 84 kg (79 kg) und die Holzrahmenbauwand 40 kg (10 kg) CO₂-Äq. pro m².

Die Ziegelwand und die Holzständerwand benötigen gutes Wetter für den Bau, während Stahlbeton- und Kalksandsteinwand auch bei Regen errichtet werden können. Bei einem Rückbau der Wand fällt in jedem Fall Bauschutt an, einige Baustoffe aber kann man wiederverwenden oder aufbereiten, wenn sie sauber ausgebaut werden.

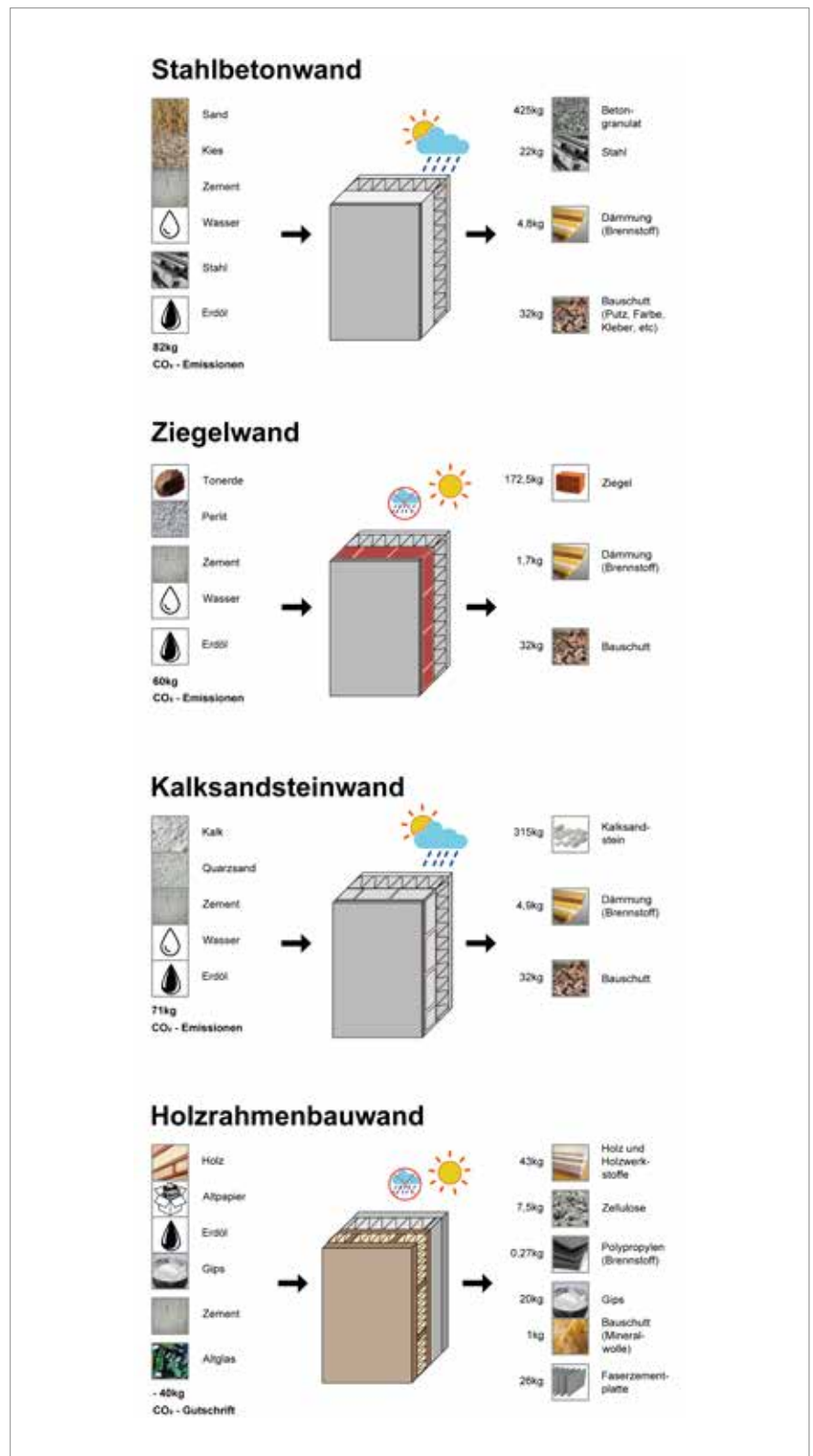


Abbildung 5 Gesamtübersicht der Außenwandtypen (eigene Darstellung TU München)

Die folgenden Flussdiagramme (Abbildung 6 bis Abbildung 9) zeigen, in welchen Lebenszyklusphasen viel Energie gebraucht wird und hohe Treibhausgasemissionen anfallen und wo niedrigere Werte für Energiebedarf und Treibhausgaspotenzial zu verzeichnen sind. Nur für die Lebenszyklusphasen Errichtung (Baustelle), Rückbau und Transport zum Entsorger bzw. Aufbereiter liegen keine Daten vor, alle anderen konnten berechnet werden.

Den Hauptanteil der nicht erneuerbaren Primärenergie entfällt bei allen Wänden auf die Herstellung. Bei den Wänden mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) bezieht man einen Austausch des WDVS nach 40 Jahren mit in die Berechnung ein, so dass hier ebenfalls nicht erneuerbare Primärenergie gebraucht wird. Die Holzwand zeigt für die Herstellung einen hohen erneuerbaren Primärenergiebedarf, da dem Holz das zur Photosynthese notwendige Sonnenlicht angerechnet wird, im Unterschied zu den mineralischen Wänden, die kaum erneuerbare Energie brauchen.

Bei den mineralischen Wänden emittiert die Herstellung am meisten Treibhausgas im Lebenszyklus, gefolgt vom Austausch, wie bei der Primärenergie. Die Holzständerwand bekommt, wie erwähnt, eine Gutschrift in der Lebenszyklusphase „Rohstoffgewinnung“, allerdings stößt die Verwertung als Brennstoff Treibhausgas aus, sichtbar am orangen Pfeil in der Phase „Abfallbewirtschaftung“.

STAHLBETONWAND

FTmehrfamilienhaus

LEBENSZYKLUS DER BAUMATERIALIEN FÜR 1m² WAND, 18 CM STAHLBETONWAND MIT 18,5 CM EPS - WDVS

- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq.]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
- Materialherstellung und -versorgung
- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq.]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
- Gutschriften für Rückgewinnung bzw. Energiegewinnung
- Keine Werte vorhanden

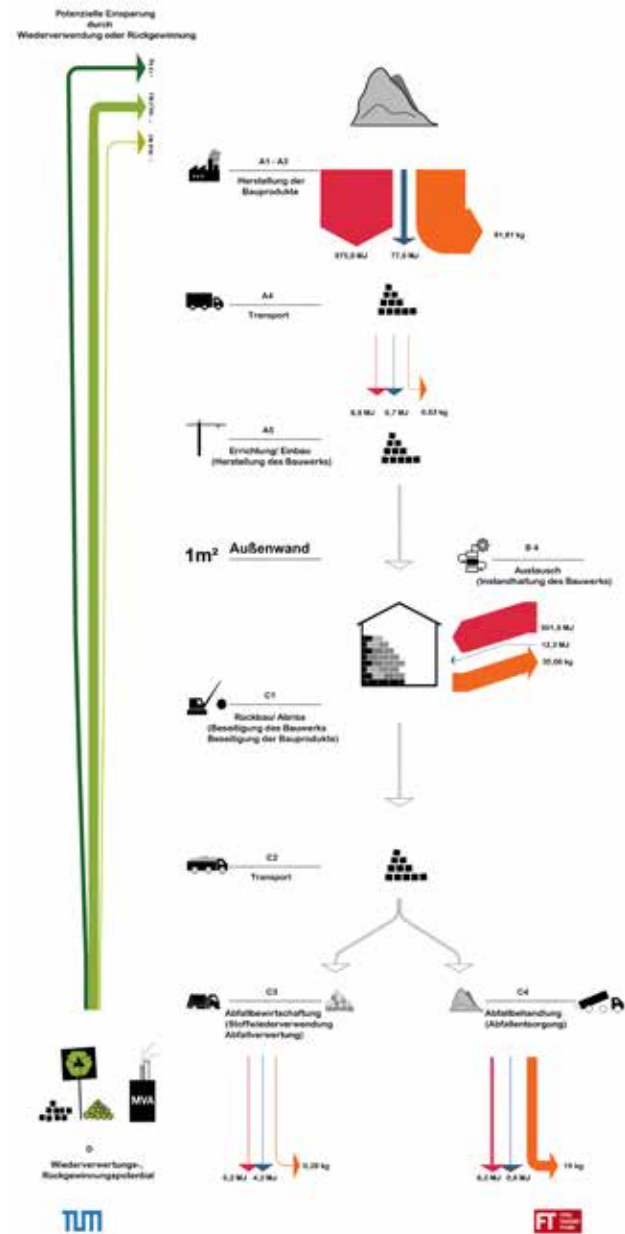


Abbildung 6 Flussdiagramm Stahlbetonwand (eigene Darstellung TU München)

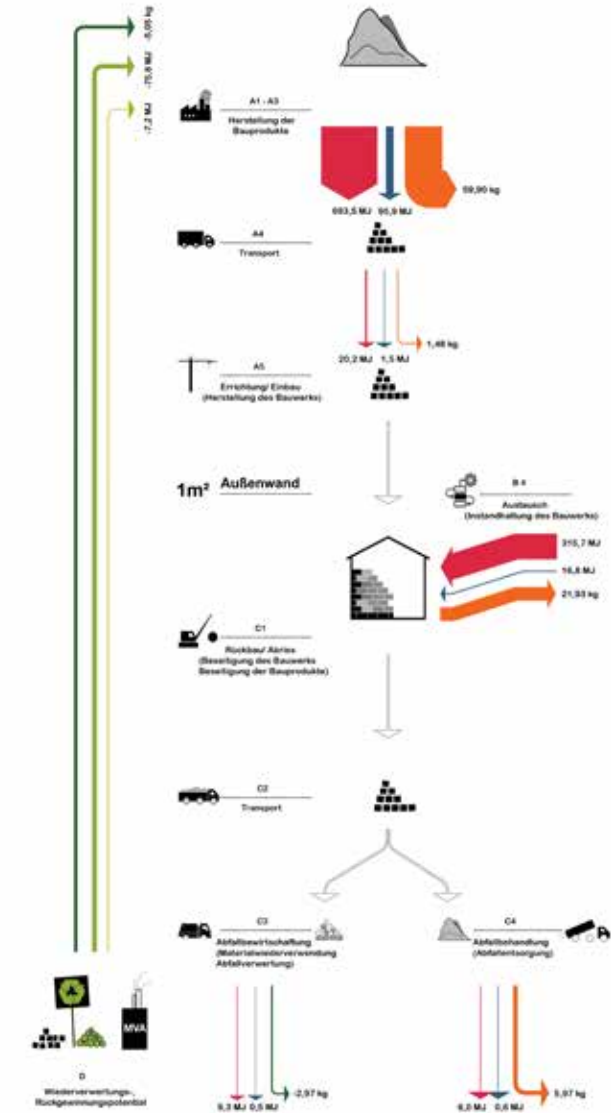
ZIEGELWAND

FTmehrhäus

LEBENSZYKLUS DER BAUMATERIALIEN FÜR 1m² WAND, 20cm Ziegel mit 6,5cm WDVS

- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
- Materialherstellung und - entorgung
-
- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
- Gutschriften für Materialrückgewinnung bzw. Energiegewinnung
- Keine Werte vorhanden

Potenzielle Einsparung durch Wiederverwertung oder Rückgewinnung



TUM

FT

Abbildung 7 Flussdiagramm Ziegelwand (eigene Darstellung TU München)

KALKSANDSTEINWAND

FTmehrfhaus

LEBENSZYKLUS DER BAUMATERIALIEN FÜR 1m² WAND; 17,5CM KALKSANDSTEINWAND MIT 19CM WDVS

- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq.]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
-
- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq.]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
-
- Keine Werte vorhanden

Potenziale Einsparung durch Weiterverwendung oder Rückgewinnung

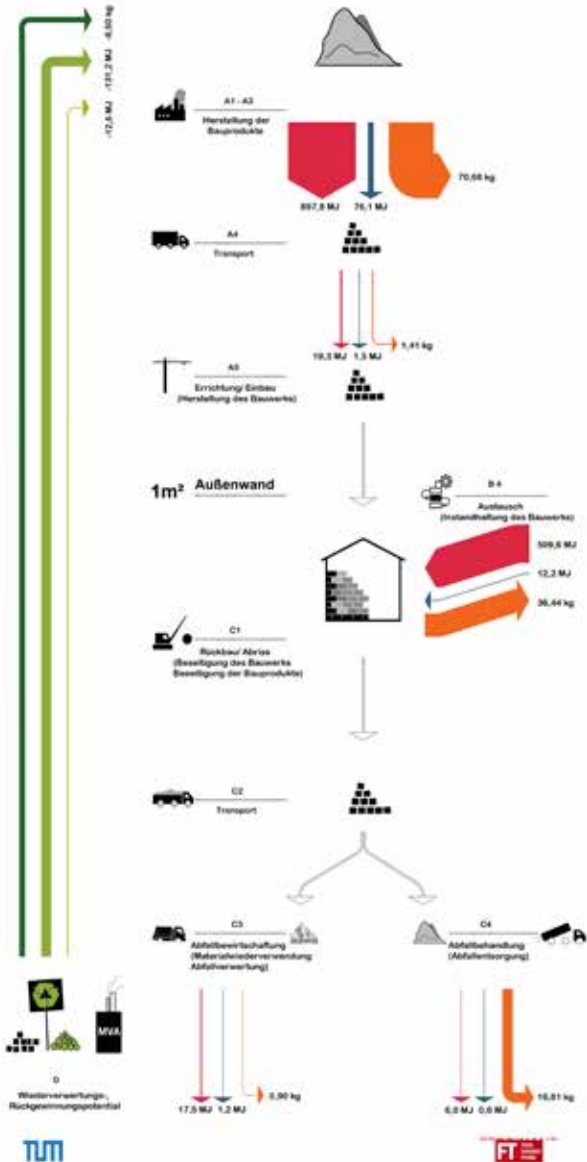


Abbildung 8 Flussdiagramm Kalksandsteinwand (eigene Darstellung TU München)0

HOLZRAHMENBAUWAND

FTmehrhäus

LEBENSZYKLUS DER BAUMATERIALIEN FÜR 1m² WAND; 20CM HOLZRAHMEN MIT ETERNIT VERKLEIDUNG

- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq.]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
- Materialherstellung und -entsorgung
- CO₂ - Emissionen [kg CO₂ - Äq.]
 - Primärenergie erneuerbar [MJ]
 - Primärenergie nicht erneuerbar [MJ]
- Gutschriften für Materialrückgewinnung bzw. Energiegewinnung
- Keine Werte vorhanden

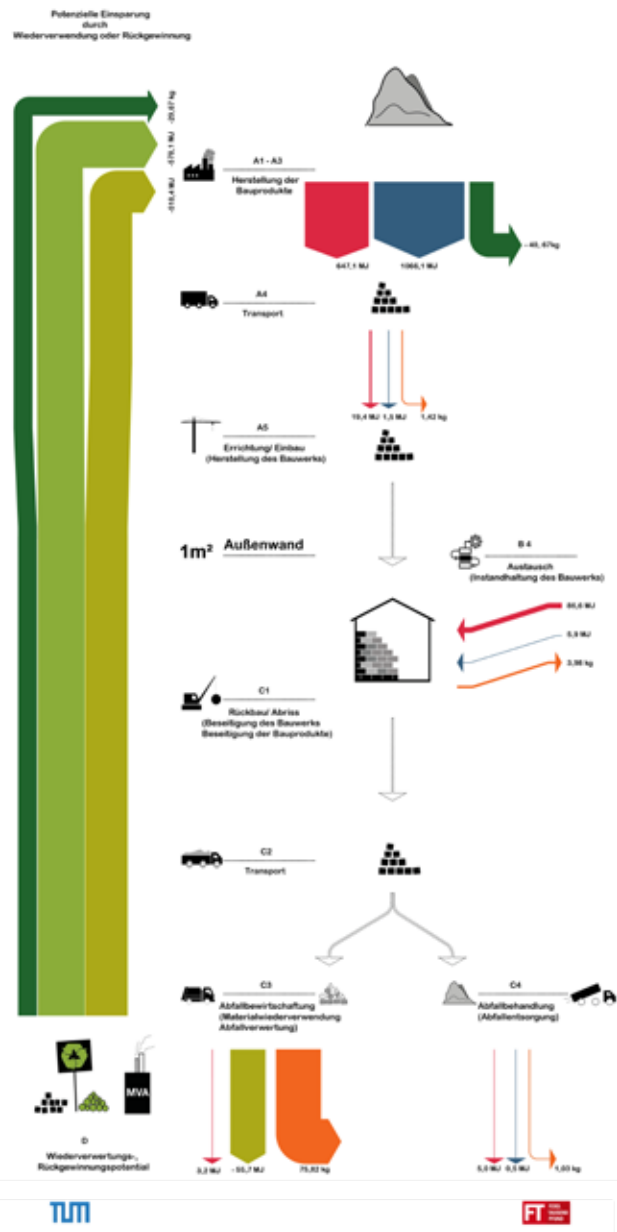


Abbildung 9 Flussdiagramm Holzständerwand mit Faserzementverkleidung (eigene Darstellung TU München)

IV. GEBÄUDEMONITORING

Zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Förderung von erneuerbaren Energien müssen neu errichtete Gebäude die aktuell geltenden baurechtlichen Mindestanforderungen einhalten. Im Rahmen der Gebäudeplanung werden hierzu verschiedenste Maßnahmen zur Einhaltung dieser Anforderungen erarbeitet, hinsichtlich Effektivität und Wirtschaftlichkeit geprüft und letztendlich im gebauten Gebäude realisiert. Die Fragen, die sich jedoch hierbei stellen, sind: Wie verhält sich das virtuelle Gebäude hinsichtlich des Energieverbrauchs und des Raumklimas in der Realität? Wie groß sind die Abweichungen zur Objektplanung und waren die Maßnahmen aus der Objektplanung, im Sinne der Energiewende, zielführend? Welchen Einfluss hat die Baukonstruktion auf den Energieverbrauch und das Raumklima? Um diese Fragen zu beantworten, werden Messdaten aus dem realen Gebäudebetrieb erhoben, analysiert und mit Angaben aus der Objektplanung verglichen.

4.1. MESSKONZEPT

Ziel des Messkonzepts ist es die Parameter zu erheben, die einen Vergleich zwischen virtuellem und realem Gebäudebetrieb ermöglichen. Erfasst werden daher Parameter wie z.B. den Nutzenergieverbrauch, die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Energiesystems sowie des Raum- und Außenklimas. Ein wichtiger Punkt in der Erfassung von Messdaten sind der Untersuchungszeitraum und die Zeitintervalle, mit der die Parameter erfasst werden. Zur Beantwortung der Frage, welchen Einfluss die Baukonstruktion auf den Energiebedarf und das Raumklima hat, müssen zudem alle relevanten Bereiche getrennt voneinander messtechnisch erfasst werden. Aus diesem Grund wird das Energiesystem und das Raumklima stockwerksspezifisch getrennt erfasst.

Um valide Aussagen trotz eines ständig schwankenden und schwer prognostizierbaren Außenklimas treffen zu können, ist wie bereits erwähnt, für einen ausreichend langen Untersuchungsrahmen zu sorgen. Das Gebäudemonitoring erstreckte sich daher über einen Zeitraum von zwei Jahren, Januar 2017 bis Dezember 2018, wobei die Parameter minütlich erfasst wurden.

Die eingesetzte Messtechnik und die erhobenen Parameter werden im Folgenden, getrennt nach der jeweiligen Funktion, erläutert.

Energiesystem

Die Messung des Energieverbrauchs erfolgt für jedes Stockwerk einzeln. Es wird die übertragene Wärme- und Kühlenergie für die jeweiligen Heizkreise der Stockwerke durch einen Energiezähler erfasst und mit dem Nutzenergiebedarf aus dem EnEV Nachweis verglichen. Dabei werden die an die Heiz- und Kühlkreise abgegebene Energie, die Vor- und Rücklauftemperatur und den Volumenstrom erfasst. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Außenwandkonstruktionen können so Aussagen darüber getroffen werden, ob und wie groß der Einfluss der Baukonstruktion auf die benötigte Wärme- und Kühlenergie ist.

Im Einzelnen werden folgende Parameter erhoben:

Vorlauftemperatur des Heiz- /Kühlkreises in °C

Rücklauftemperatur des Heiz- /Kühlkreises in °C

Volumenstrom in kg/s

Thermische Leistung in W



Abbildung 10 Messung der Vorlauftemperatur (Fotoquelle: © Lehrstuhl ENPB, TU München)

Raumklima

Raumklimatische Parameter werden über die drei Stockwerke in repräsentativen Büroräumen erhoben. Es werden dabei die Strahlungstemperatur, Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit erfasst. Da der Nutzer mit seinem Verhalten einen maßgeblichen Einfluss auf das Raumklima und dementsprechend auch auf die benötigten Wärme- und Kühlenergie hat, werden mit Hilfe von EnOcean Kontakten die Stellungen der Fenstergriffe (geschlossen, gekippt oder geöffnet) ausgelesen. Anhand dieser Messdaten wird gezeigt wie der Nutzer handelt und welchen Einfluss er dabei auf das Raumklima ausübt. Erfasst werden folgende Parameter:

Strahlungstemperatur in °C

Lufttemperatur in °C

Relative Luftfeuchtigkeit in %

Wärmestrom durch Wandelement in W

Außenklima

Da das thermische Verhalten des Gebäudes und der resultierende Energieverbrauch maßgeblich vom Außenklima beeinflusst wird, werden relevante Parameter des Außenklimas mittels einer Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes erfasst. Dabei spielt die Außenlufttemperatur eine maßgebliche Rolle, da diese

einen direkten Einfluss auf den Transmissionswärmeverlust hat. Darüber hinaus werden auch die Außenluftfeuchtigkeit und die Globalstrahlung ermittelt.

Lufttemperatur in °C

Relative Luftfeuchtigkeit in %

Globalstrahlung in W

Windgeschwindigkeit in m/s

Windrichtung in °

Niederschlag in mm

Alle Messdaten aus dem Energiesystem, dem Raumklima und der Wetterstation werden zentral in einem Beckhoff Messsystem zusammengeführt, lokal gespeichert und in regelmäßigen Abständen in eine SQL Datenbank auf einem externen Server gespeichert. Dies ermöglicht eine Analyse der Daten in Echtzeit, ohne dass vor Ort die Daten ausgelesen werden müssen.

Der schematische Aufbau der eingesetzten Messtechnik ist in Abbildung 11 dargestellt.

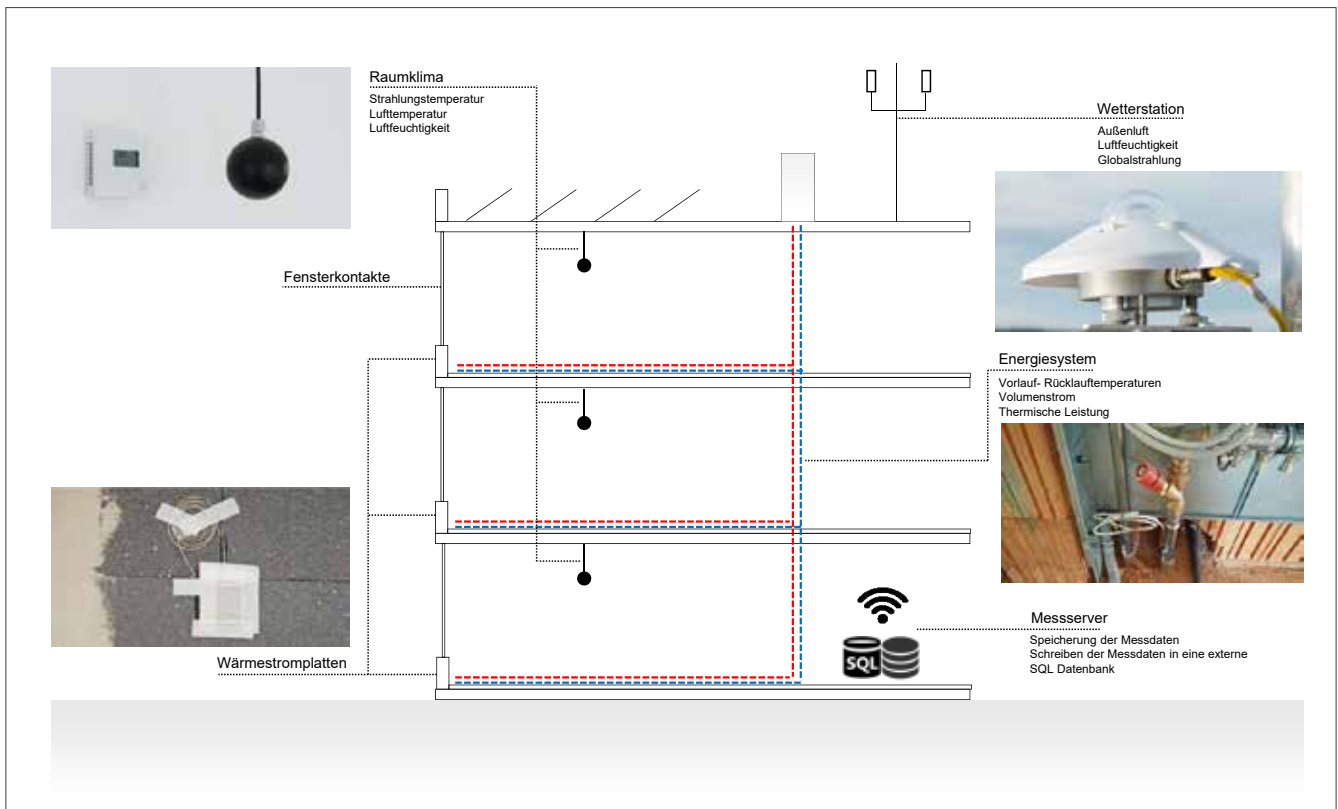


Abbildung 11 Schematische Darstellung der Messsensoren zum Energiesystem, Raumklima und der Fassaden (eigene Darstellung TU München)

4.2. AUSSENKLIMA

Da der Energieverbrauch, die Behaglichkeit im Gebäude und auch der Wärmestrom durch die Wand maßgeblich vom Außenklima beeinflusst werden, wird im Folgenden kurz das Außenklima der betrachteten Jahre 2017 und 2018 dargestellt und verglichen. Das Referenzklima (Potsdam), welches zur Bilanzierung gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) verwendet wird, sowie die Ergebnisse aus dem Monitoring der Jahre 2017 und 2018 am Gebäude in Regensburg sind in Tabelle 3 dargestellt.

TABELLE 3 LUFTTEMPERATUREN DES AUSSENKLIMAS GEMÄSS ENEV BILANZIERUNG UND FÜR DIE JAHRE 2017 UND 2018 AUS DER WETTERSTATION AM FTMEHRHAUS IN REGENSBURG

Monat	EnEV	2017	2018
Januar	-1,3	-5,0	3,4
Februar	0,6	3,1	-1,6
März	4,1	7,7	3,2
April	9,5	8,6	14,1
Mai	12,9	15,5	17,9
Juni	15,7	20,0	19,4
Juli	18,0	20,0	21,3
August	18,3	19,0	21,7
September	14,4	12,8	15,9
Oktober	9,1	10,6	11,7
November	4,7	4,6	5,1
Dezember	1,3	1,7	2,7
Jahresmittel	8,9	9,9	11,3

Wie aus Tabelle 3 ersichtlich wird, zeigt sich, dass die Lufttemperatur im Jahresmittel der Jahre 2017 und 2018 wärmer war als das Referenzklima gemäß EnEV. Im Jahresmittel liegt die Lufttemperatur beim Referenzklima bei 8,9 °C während es in 2017 bei 9,9 °C und 2018 bei 11,3 °C lag. Betrachtet man spezifisch die Winter und Sommermonate so zeigt sich besonders in den Sommermonaten (Juni, Juli und August), dass die Außenlufttemperaturen deutlich über dem Referenzklima liegen. Des Weiteren zeigt sich im Jahr 2018, dass bereits ab Mai signifikant höhere Temperaturen herrschten als noch im Jahre 2017 bzw. im Referenzklima. Diese hohen Temperaturen machen sich besonders in der benötigten Kühlenergie bemerkbar, wie in Kapitel 4.3 zu sehen.

4.3. ERGEBNISSE ENERGIEVERBRAUCH

Mit Hilfe des energetischen Monitorings lassen sich Aussagen über den Einfluss des Außenklimas, der Außenwandkonstruktion und des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch treffen. Darüber hinaus ist es auch möglich den im Rahmen der Bilanzierung gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) prognostizierten Energiebedarf mit den realen Messdaten zu vergleichen. Die gesamten Ergebnisse aus der EnEV Bilanzierung sind in Tabelle 5 dargestellt.

TABELLE 4 GESAMTER JÄHRLICHER NUTZENERGIEBEDARF GEMÄSS ENEV BILANZIERUNG

Heizung	Kühlung	Lüftung	Beleuchtung	Warmwasser
39.937	0	0	21.236	0

Der im Rahmen der Baugenehmigung erstellte Nachweis gemäß EnEV [Quelle EnEV Nachweis] weist dabei einen Nutzenergiebedarf für die Beheizung des Gebäudes von 39.937 kWh/a aus. Die benötigte Energie für Beleuchtung beläuft sich auf 21.236 kWh/a, wird aber im Weiteren nicht näher betrachtet, da die Beleuchtung nicht Bestandteil des Monitorings ist. Für die Kühlung und Belüftung des Gebäudes sowie den Warmwasserbedarf wird kein Energiebedarf bilanziert und ausgewiesen.

Die gemessenen Energieverbräuche für die Heizung liegen dagegen für das Jahr 2017 bei 36.428 kWh/a und für 2018 bei 36.175 kWh/a. Mit dem Energiebedarf aus der EnEV Bilanzierung zeigt sich, dass der reale Nutzenergieverbrauch um rund 10 % unterhalb der EnEV Bilanzierung liegt.

Betrachtet man den Nutzenergiebedarf für die Kühlung so zeigt sich, dass in der EnEV Bilanzierung keine Kühlung berücksichtigt wurde. In der Realität weist das Gebäude jedoch einen Kühlenergieverbrauch auf. Für das Jahr 2017 wurde ein Kühlenergieverbrauch von 5.646 kWh/a gemessen und für 2018 von 9.688 kWh/a.

Zusammenfassend zeigt sich, dass der reale Gesamtenergieverbrauch für Heizung und Kühlung über der Bilanzierung gemäß EnEV liegt, siehe Tabelle 5. Für 2017 ergibt sich eine Überschreitung von + 5,4 % und für 2018 + 14,8 %. Die Überschreitung lässt sich dabei hauptsächlich auf den fehlenden Kühlenergiebedarf in der EnEV Bilanzierung zurückführen, der im Nachweis gemäß EnEV gar nicht berücksichtigt wurde.

TABELLE 5 ZUSAMMENFASSUNG DER NUTZENERGIE FÜR HEIZUNG, KÜHLUNG UND LÜFTUNG FÜR DIE BILANZIERUNG GEMÄSS ENEV SOWIE FÜR DAS MONITORING IN 2017 UND 2018

	Gesamt	Heizung	Kühlung	Lüftung
EnEV	39.937	39.937	0	0
2017	42.074	36.428	5.646	0
2018	45.863	36.175	9.688	0

Betrachtet man die benötigte Nutzenergie aus der EnEV Bilanzierung, so zeigt sich, dass in den Monaten Mai bis September kein Energiebedarf ausgewiesen wird. Auch im April wird lediglich ein Nutzenergiebedarf von 576 kWh ausgewiesen.

VERGLEICH DER NUTZENERGIE
EnEV 2017-2018, in [kWh]

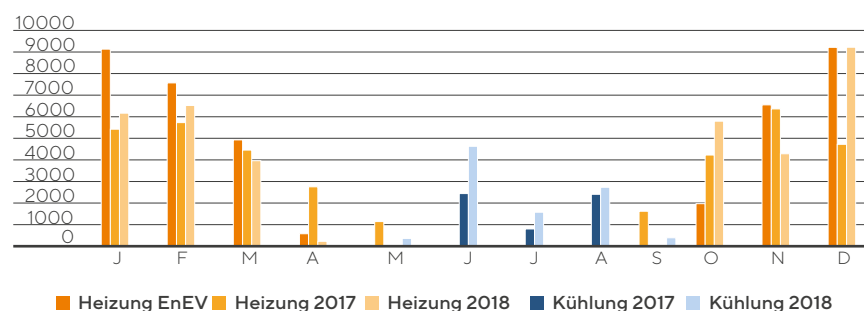


Abbildung 12 Vergleich zwischen dem Nutzenergieverbrauch 2017 und 2018 zu dem prognostizierten Nutzenergiebedarf aus der EnEV Berechnung

Die stockwerksspezifische Auswertung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs ist in Abbildung 13 dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass der Heizenergieverbrauch im 1. Obergeschoss (1.OG), verglichen mit dem Erdgeschoss (EG) und dem 2. Obergeschoss (2.OG), signifikant geringer ausfällt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das 1. OG sowohl nach oben als auch unten an beheizte Gebäudeteile angrenzt und somit einen geringeren Transmissionswärmeverlust aufweist. Es wird somit weniger Energie zur Temperierung benötigt wodurch Rückschlüsse auf die jeweilige Baukonstruktion schwer möglich sind. Für den Sommerfall und der benötigten Kühlenergie zeigt sich, dass das 1.OG im Jahr 2017 mehr Energie zur Kühlung benötigte.

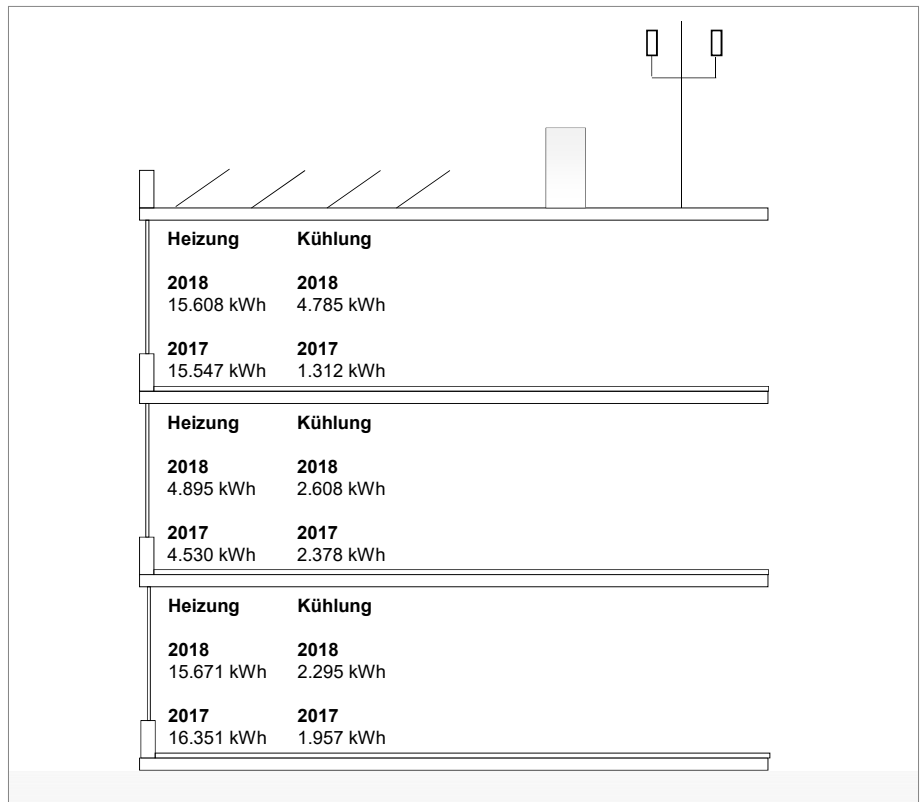


Abbildung 13 Energieverbräuche für Heizung und Kühlung für die Jahre 2017 und 2018 getrennt für die einzelnen Stockwerke (eigene Darstellung TU München)

4.4. ERGEBNISSE RAUMKLIMA

Im folgenden Kapitel wird das Raumklima dargestellt und anschließend die Ergebnisse bewertet. Die Bewertung findet dabei gemäß DIN EN 15251, in Anlehnung an DIN 4108-2 und der Arbeitsstätten Richtlinie ASR A3.5 statt. Anhand der DIN EN 15251 wird die Qualität des Raumklimas analysiert und anhand von gegebenen Qualitäts-Kategorien bewertet. In Anlehnung an die DIN 4108 und unter Berücksichtigung der Arbeitsstätten Richtlinie ASR A3.5 findet eine Einordnung der gemessenen Temperaturen mit den Anforderungswerten statt.

- DIN EN 15251 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik
- DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- Technische Regeln für Arbeitsstätten Raumtemperatur (ASR A3.5)

4.4.1. TEMPERATUR JAHRESVERLAUF

Mit Hilfe von Jahresverläufen kann das dynamische Verhalten über ein komplettes Jahr dargestellt werden. Anhand der Außenlufttemperatur lässt sich dabei der saisonale Verlauf von Winter und Sommer deutlich erkennen, siehe Abbildung 14 und Abbildung 15. Die geringsten Temperaturen lagen bei $-13,1^{\circ}\text{C}$ im Jahr 2017 und $-13,0^{\circ}\text{C}$ im Jahr 2018. Während der Sommerperiode betragen die höchsten Temperaturen $+33,6^{\circ}\text{C}$ im Jahr 2017 und $+34,8^{\circ}\text{C}$ im Jahr 2018.

JAHRESVERLAUF DER LUFTTEMPERATUREN FÜR DAS JAHR 2017

Lufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$

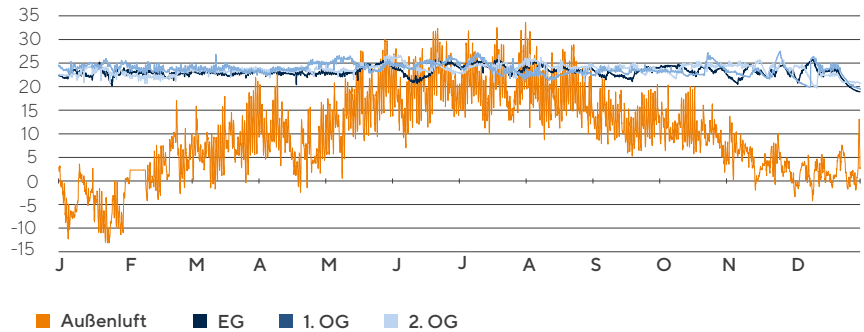


Abbildung 14 Verlauf der Lufttemperatur für das Jahr 2017

JAHRESVERLAUF DER LUFTTEMPERATUREN FÜR DAS JAHR 2018

Lufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$

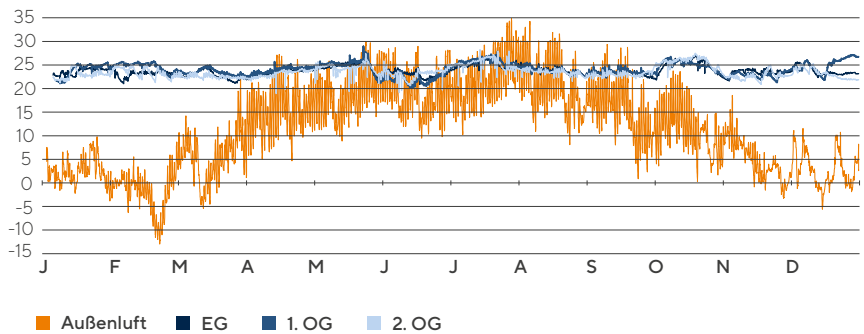


Abbildung 15 Verlauf der Lufttemperatur für das Jahr 2018

Hinsichtlich der Raumlufttemperaturen zeigt sich, dass diese grundsätzlich keinen großen Schwankungen unterliegen, verglichen mit 2017 sind diese etwas höher in 2018. Es zeigt sich, bspw. in den Sommermonaten, dass stellenweise die 25°C überschritten werden. Zum größten Teil des Jahres jedoch liegen die Lufttemperaturen allerdings zwischen 20°C und 25°C . Um das Raumklima und die eventuelle sommerliche Überhitzung zu analysieren, werden die operativen Temperaturen nach den Übergradstunden (über 26°C) ausgewertet. Dabei wird die Anzahl an Stunden aufgezeigt, in denen die operative Temperatur eine gewisse Schwelle überschreitet. Die Analysen zu den Übergradstunden werden im Kapitel 4.4.3 beschrieben.

4.4.2. BEWERTUNG DES RAUMKLIMAS

Die Bewertung des Raumklimas erfolgt gemäß DIN EN 15251. Dabei wird das Raumklima anhand des vorausgesagten mittleren Votums (Predicted Mean Votes - PMV) bzw. am vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen (Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD) bewertet. Der PMV stellt dabei ein mittleres Maß zur Beurteilung des Raumklimas für eine große Personengruppe dar. Berücksichtigt wird dabei das Wärmegleichgewicht des menschlichen Körpers, wobei ein thermisches

Ungleichgewicht als warm bzw. kalt empfunden und bewertet werden kann. Das thermische Ungleichgewicht bzw. das Raumklima wird anhand einer 7-stufigen Skala (von +3 heiß bis -3 kalt) eingeordnet, siehe Tabelle 6.

TABELLE 6 SKALA DER KLIMABEURTEILUNG

+3	heiß
+2	warm
+1	etwas warm
0	neutral
-1	etwas kühl
-2	kühl
-3	kalt

Bei der Bewertung des PMV wird grundsätzlich zwischen maschinell beheizten und gekühlten Gebäuden und nicht maschinell gekühlten Gebäuden unterschieden. Da im vorliegenden Gebäude auch im Sommer durch die Wärmepumpe und die Fußbodenheizung/-kühlung gekühlt wird, muss die Bewertung für maschinell gekühlte Gebäude berücksichtigt werden. Hierzu wird der PMV in vier Kategorien eingeordnet. Wobei Kategorie I die beste und Kategorie IV die schlechteste darstellt. Die Bedingungen und die Einteilung des PMV in die Kategorien ist in Tabelle 7 dargestellt.

TABELLE 7 KATEGORIEN FÜR DIE BEWERTUNG DES RAUMKLIMAS FÜR MASCHINELL BEHEIZTE UND GEKÜHLTE GEBÄUDE

Kategorie	PPD in [%]	PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	> 15	PMV < -0,7 oder +0,7 < PMV

Zum besseren Verständnis, was die unterschiedlichen Kategorien für das Gebäude und den Nutzer bedeuten, liefert die DIN EN 15251 eine sprachliche Bewertung der einzelnen Kategorien. Wie aus Tabelle 8 ersichtlich stellt bspw. Kategorie I ein hohes Maß an Erwartungen an das Raumklima zu Grunde. Kategorie II stellt ein normales Maß an Erwartungen dar, wobei diese Kategorie in der Regel für Neubauten und sanierte Gebäude angestrebt wird. Kategorie III und IV stellen maximal ein moderates Maß an Erwartungen dar. Das Raumklima in Neubauten sollte daher nur in äußerst begrenzter Form dieser Kategorien entsprechen.

TABELLE 8 BESCHREIBUNG DER RAUMKLIMAKATEGORIEN GEMÄSS DIN EN 15251

Kategorie	Beschreibung
I	Hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen
II	Normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude
III	Annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden
IV	Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden

Zur Ermittlung des PMV dienen folgende sechs Raumklimaparameter:

- Lufttemperatur in °C
- Mittlere Strahlungstemperatur in °C
- Relative Luftfeuchtigkeit in %
- Luftgeschwindigkeit in m/s
- Aktivitätsgrad in met
- Wärmeleitwiderstand der Kleidung in clo

Mit Hilfe des Monitorings wurden die Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit erhoben. Da die Luftgeschwindigkeit, der Aktivitätsgrad und der Wärmeleitwiderstand der Kleidung nicht erhoben wurden, wurden hierbei pauschale Kennwerte angenommen. Für die Luftgeschwindigkeit 0,15 m/s, Aktivitätsgrad 1,2 met (entspricht einer sitzenden Tätigkeit im Büro) sowie für die Kleidung 0,7 clo im Winter (entspricht langer Hose und langärmeliges Oberteil) sowie 0,5 clo im Sommer (entspricht langer Hose und kurzärmeliges Oberteil).

QUALITÄT DES RAUMKLIMAS 2017

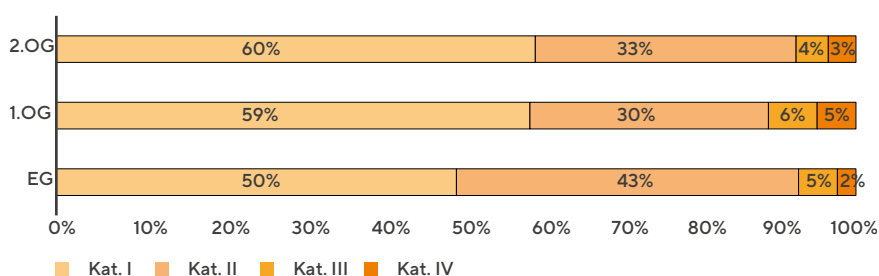


Abbildung 16 Einordnung des thermischen Raumklimas für das Jahr 2017 anhand der Kategorien gemäß DIN EN 15251

Für das Jahr 2017 zeigt sich, dass in allen Stockwerken das Raumklima während der Nutzungszeit – hierbei wurde angenommen, dass Nutzer werktags zwischen 07:00 und 18:30 Uhr anwesend sind – zum überwiegenden Teil des Jahres, zu ca. 90%, Kategorie I bzw. Kategorie II entspricht. Nur lediglich zu etwa 10 % der jährlichen Nutzungszeit ist das Raumklima der Kategorie III bzw. IV zuzuordnen. Des Weiteren zeigt sich, dass das Raumklima im 1. OG im Vergleich zum EG und 2.OG etwas höhere Anteile in Kategorie III und IV aufweist.

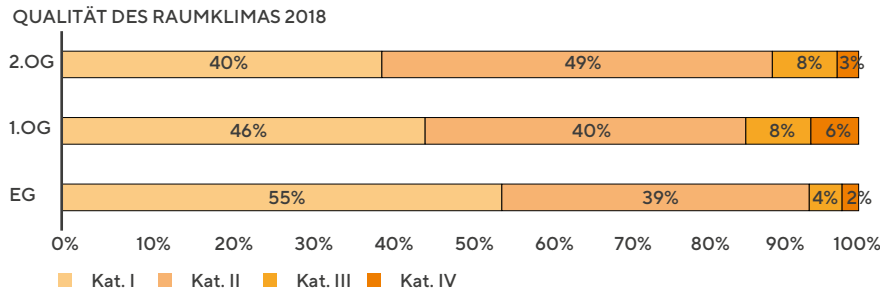


Abbildung 17 Einordnung des thermischen Raumklimas für das Jahr 2018 anhand der Kategorien gemäß DIN EN 15251

Dem gegenüber zeigt sich für das Jahr 2018 ein ähnliches Bild. Das Raumklima ist dabei zum überwiegenden Teil der Kategorie I bzw. II zuzuordnen. Für das Jahr 2018 zeigt sich außerdem, dass der prozentuale Anteil im Gegensatz zu 2017 von Kategorie III bzw. IV leicht gestiegen ist. Dieser leichte Anstieg lässt sich durch das wärmere Jahr 2018 begründen. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben war das Jahr durch einen heißeren Sommer und grundsätzlich höhere mittlere Lufttemperaturen geprägt. Stockwerksspezifisch zeigt sich außerdem auch, dass das Raumklima im 1.OG zu höheren Anteilen der Kategorie III und IV entspricht als im EG und 2.OG.

Anhand der systematischen Auswertung der Raumklimas zeigt sich, dass sich die Anteile von Kategorie III und IV vor allem der sommerlichen Überhitzung beschreiben lassen. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel die sommerliche Überhitzung genauer analysiert.

4.4.3. SOMMERLICHE ÜBERHITZUNG

Zur Bewertung des Raumklimas während der sommerheißen Periode werden im Folgenden die Übergradstunden analysiert. Übergradstunden bezeichnen dabei die Anzahl an Stunden, in denen die operative Temperatur während der Nutzungszeit einen Schwellenwert überschreitet. In DIN 4108 wird unter Berücksichtigung der Klimaregion B der Bezugswert zur Bewertung der sommerlichen Überhitzung von 26 °C formuliert. Auch die Arbeitsstätten-Richtlinie „ASR A3.5 Raumtemperatur“ bezieht sich auf eine Lufttemperatur von 26 °C. Hierbei wird aufgeführt, dass sofern die Lufttemperatur 26 °C überschreitet Maßnahmen ergriffen werden sollen (bspw. Nachtlüftung, effektivere Steuerung des Sonnenschutzes, Lockerung der Bekleidungsregeln).

TEMPERATURÜBERGRADSTUNDEN (>26°C)
Stunden

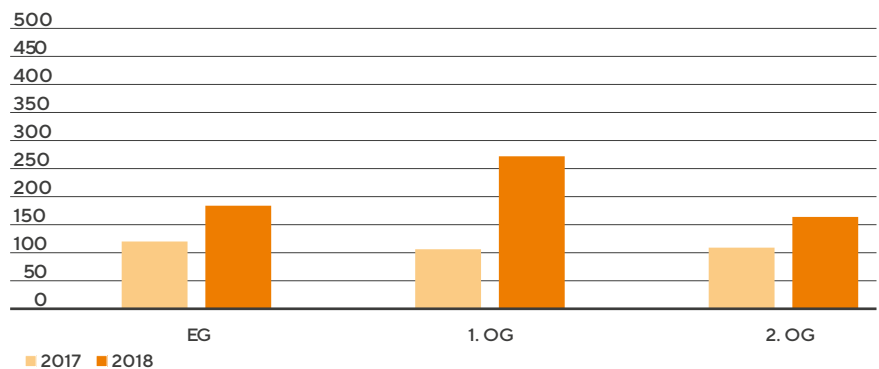


Abbildung 18 Übergradstunden drei Stockwerke für 2017 und 2018

Wie aus Abbildung 18 ersichtlich, wird die operative Temperatur im Jahr 2017 nur zu etwa 100 Stunden überschritten. Dabei zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Stockwerken. Für das Jahr 2018 zeigt sich, dass die Übergradstunden

den leicht ansteigen, wie bereits beschrieben ist dabei der mittlere Anstieg der Außenlufttemperaturen zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Stockwerke wird der Schwellenwert im 1.OG öfters überschritten als im EG und 2.OG.

4.5. ERGEBNISSE WÄRMESTROM

Durch die Messung des Wärmestroms [W/m^2] durch die Außenwand lassen sich Aussagen zu Transmissionswärmeverlusten und -gewinnen des Gebäudes nach außen, bzw. von außen treffen. Der Wärmestrom wird dabei durch zwei Wärmestrommessplatten auf der Südseite jedes Stockwerks aufgezeichnet. Eine der Wärmestrommessplatten jedes Stockwerks sitzt unter dem Außenputz auf dem Dämmmaterial. Das Gegenstück befindet sich horizontal, auf gleicher Ebene, unter dem Innenputz der Außenwand auf dem jeweiligen Baumaterial (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19 Wärmestrommessplatten innen (Fotoquelle: © Lehrstuhl ENPB, TU München)

Der anhand der Wärmestrommessplatten ermittelte Wärmestrom, durch 1m² Außenwand im Erdgeschoss (EG), 1. Obergeschoss (1.OG) und 2. Obergeschoss (2.OG) wird im Folgenden exemplarisch über den Jahresverlauf dargestellt. Wird der minütlich gemessene Wärmestrom über das Jahr aufsummiert und in Stundenwerte umgerechnet ergeben sich daraus die jährlichen Transmissionswärmeverluste und -gewinne [kWh/m²/a] durch die Außenwände. Da die Daten für die Jahre 2017 und 2018 die gleichen Tendenzen aufzeigen, ergeben sich ebenfalls bei der grafischen Darstellung über den Jahresverlauf sehr ähnliche Muster. Auf Grund dessen werden die Daten des Jahres 2018 exemplarisch in Grafiken dargestellt. In Tabelle 9 werden hingegen die Transmissionswärmeverluste der einzelnen Stockwerke beider Jahre miteinander verglichen. Von den Transmissionswärmeverlusten sind dabei schon die Transmissionswärmegewinne abgezogen. Über die Jahre 2017 und 2018 hinweg ergeben sich somit mehr Transmissionswärmeverluste als -gewinne.

TABELLE 9 TRANSMISSIONSWÄRMEVERLUSTE UND INNENTEMPERATUR PRO STOCKWERK

Geschoss	Transmissionswärmeverluste [kWh/m ² /a]		Innentemperatur [°C]	
	2017	2018	2017	2018
EG	16,0	10,1	23,2	23,7
1.OG	13,0	9,8	23,5	23,9
2.OG	18,3	7,0	23,7	23,5

Dabei ist zu erkennen, dass sich die Transmissionswärmeverluste je nach Stockwerk um maximal 30.0% im Jahr 2017, bzw. 31.0% im Jahr 2018 unterscheiden. Durch den nahezu gleichen U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizienten) der Außenwandkonstruktionen in den drei Stockwerken, ergibt sich die Abweichung durch verschiedene Wärmespeicherkapazitäten (Stahlbeton: ca. 880 J/(kg * K), Wärmedämmziegel: ca. 836 J/(kg * K), Kalksandstein: ca. 741 J/(kg * K)) der Materialien und Wärmeverteilungen innerhalb des Materials sowie durch deren Positionierung im Gebäude. Zudem ist zu erkennen, dass die Transmissionswärmeverluste von 2017 auf 2018, im Schnitt über alle Stockwerke, um 41,1% gesunken ist. Das ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die durchschnittliche Außentemperatur am Standort des Gebäudes von 2017 auf 2018 um 1,4°C, also 14.1%, angestiegen ist. Daraus ergibt sich über alle Stockwerke hinweg eine mittlere Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur von 13,6°C im Jahr 2017 und 12,4°C im Jahr 2018. Die Verringerung der Transmissionswärmeverluste spiegelt sich im geringeren Heizenergiebedarf für 2018 im Vergleich zu 2017 wieder.

In den folgenden Grafiken (Abbildung 21, Abbildung 22 und Abbildung 23) werden die Transmissionswärmeverluste, in kWh/m² Außenwand, sowohl mit der Außen- und Innentemperatur, als auch mit der der Außen- und Innenoberflächentemperatur der Außenwand, über den Jahresverlauf für alle drei Stockwerke miteinander verglichen. Dabei ist zu beachten, dass Transmissionswärmeverluste dann vorherrschen, wenn der Wärmestrom einen positiven Wert aufweist, und Transmissionswärmegewinne dann, wenn der Wärmestrom einen negativen Wert aufweist.

Beim Vergleich der drei Grafiken lässt sich daher sehr gut erkennen, dass von Mitte September bis Anfang Mai Transmissionswärmeverluste, und lediglich von Mitte April, Anfang Mai bis Mitte September Transmissionswärmegewinne vorherrschen. Dabei ist ebenfalls zu erkennen, dass die Transmissionswärmeverluste über das Jahr deutlich höher als die Transmissionswärmegewinne sind. Generell lassen sich beim Vergleich der drei Grafiken nur geringfügige Veränderungen erkennen. Für alle Berechnungen wird die gleiche standortspezifisch ermittelte Außentemperatur verwendet, deshalb ist deren Verlauf in allen drei Grafiken derselbe.



Abbildung 20 Wärmestrommessplatten außen (Fotoquelle: © Lehrstuhl ENPB, TU München)

Ungefähr den gleichen Verlauf wie die Außentemperatur zeigt die Außenoberflächentemperatur, mit durchschnittlich $+5,5^{\circ}\text{C}$ im EG, $+6,0^{\circ}\text{C}$ im 1. OG und $+5,9^{\circ}\text{C}$ im 2. OG, auf. Die Baumaterialien heizen sich durch die direkte und indirekte Sonneneinstrahlung auf und speichern die Wärme. Dadurch ergeben sich über das ganze Jahr hinweg höhere Werte als bei der Außentemperatur. Bei steigender Außen- und Außenoberflächentemperatur verringern sich die Transmissionswärmeverluste und werden zu Transmissionswärmegewinnen, die, bei hohen Innentemperaturen im Hochsommer, gegebenenfalls durch die Kühlung des Gebäudes, ausgeglichen werden müssen. Die Innen- und Innenoberflächentemperaturen verlaufen fast deckungsgleich. Dadurch, dass die Innenoberflächentemperatur nicht durch die Sonneneinstrahlung beeinflusst wird, ergibt sich über das Jahr hinweg lediglich von Oktober bis April eine Verschiebung. Danach liegt die Innenoberflächentemperatur der Außenwand, bedingt durch die deutlich geringere Außentemperatur in diesen Monaten, unter der Innentemperatur.

TRANSMISSIONSWARMEVERLUSTE AUSSENWAND EG (STAHLBETON)

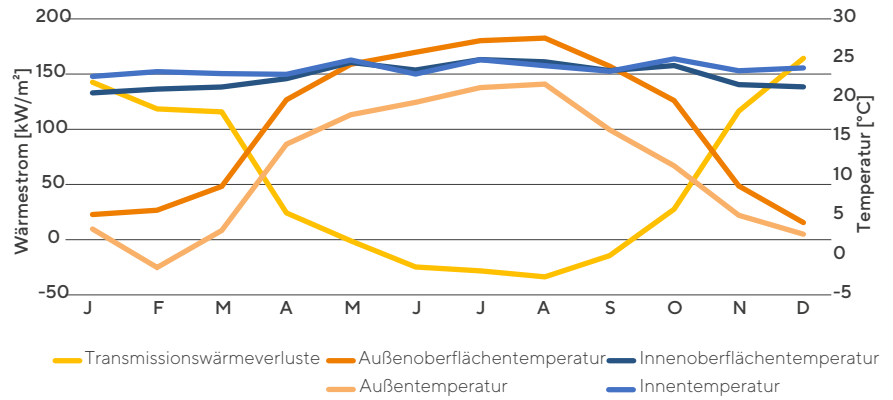


Abbildung 21 Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände im EG

TRANSMISSIONSWARMEVERLUSTE AUSSENWAND 1.OG (MAUERZIEGEL)

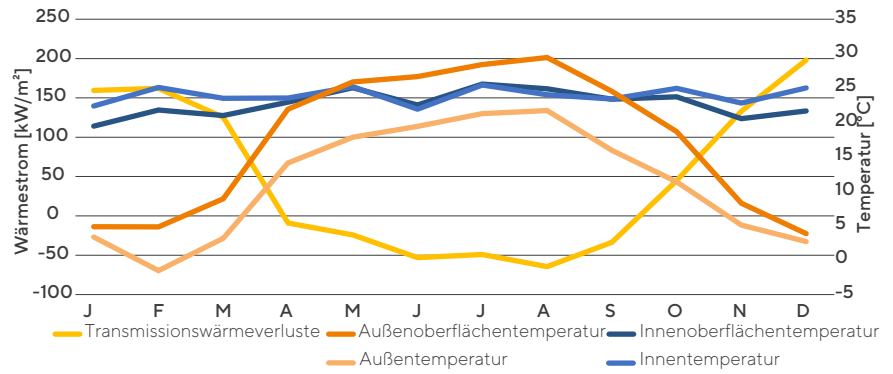


Abbildung 22 Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände im 1.OG

TRANSMISSIONSWARMEVERLUSTE AUSSENWAND 2.OG (KALKSANDSTEIN)

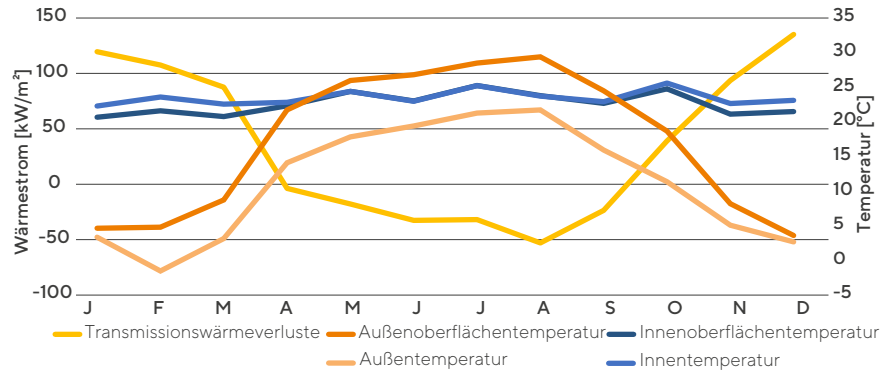


Abbildung 23 Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände im 2.OG

Bezogen auf den Wärmestrom ergeben sich keine gravierenden und auffälligen Unterschiede beim Vergleich der drei Außenwandkonstruktionen über die Jahre 2017 und 2018. Dies ist hauptsächlich auf den nahezu gleichen U-Wert zurückzuführen.



FT

**FERD.
TAUSEND
PFUND**

V. ZUSAMMENFASSUNG / FAZIT

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein ganzheitlicher Analyse- und Bewertungsansatz verfolgt. Dabei wurden das Gesamtgebäude und insbesondere die unterschiedlichen Massivbauweisen (Stahlbeton + WDVS, Ziegel + WDVS und Kalk-Sand-Stein + WDVS) der jeweiligen Stockwerke hinsichtlich eines nachhaltigen Gesamtkonzepts untersucht. Dabei spielten vor allem die Lebenszyklusanalyse als auch das Gebäudemonitoring eine zentrale Rolle.

Mit Hilfe der Lebenszyklusanalyse wurden die Bauarten hinsichtlich des Treibhauspotentials (in kg CO₂-Äq.) und dem primärenergetischen Aufwand (in MJ) untersucht.

Das Ergebnis macht dabei deutlich, dass die drei Massivbauweisen jeweils einen hohen Wert an Grauer Energie aufweisen. Über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung und Rückbau) emittiert ein m² Stahlbetonaußenwand 134 kg-CO₂-Äq., ein m² Kalksandsteinwand 124 kg-CO₂-Äq. und die die Ziegelwand 84 kg-CO₂-Äq. Wenn man für die mögliche Wiederverwendung eine Gutschrift (Phase D) hinzurechnet, reduzieren sich diese Werte jeweils um 12 kg, 8 kg bzw. 5 kg. Um die Umweltauswirkungen einzuordnen wurden zudem die Umweltwirkungen einer Holzkonstruktion ermittelt. Da Holz Kohlenstoff aus dem CO₂ der Luft bindet dienen Gebäude die zu einem hohen Anteil aus Holz errichtet sind somit für die Zeit ihres Bestehens als Kohlenstoffsенke und weisen konventionellen Baustoffen gegenüber eine bessere Treibhausgas- und Energiebilanz, bezogen auf die Graue Energie und die Grauen Treibhausgasemissionen, auf. Allerdings sind die Emissionen der Betriebsphase des Gebäudes sehr viel höher als die Emissionen für die anderen Lebenszyklusphasen, so dass sich die Unterschiede der einzelnen Wandtypen etwas relativieren, wenn die Außenbauteile einen sehr guten Energiestandard aufweisen und damit den Energiebedarf im Gebäudebetrieb gering halten. Generell sollte bei der Auswahl der Baustoffe darauf geachtet werden, dass regionale Bauprodukte mit geringen Transportdistanzen gewählt werden. Das wiederum kann sich positiv auf die lebenszyklusbasierten Bilanzen auswirken.

Die Ergebnisse des Gebäudemonitoring lassen erkennen, dass der vor dem Bau des Gebäudes errechnete Heizenergiebedarf nach EnEV von den Werten des Monitorings um 10 % unterschritten wird. Dabei muss berücksichtigt werden, dass für den EnEV-Nachweis keine Kühlung des Gebäudes berücksichtigt wurde, diese aber nach dem Bau des Gebäudes im Sommer durch die Wärmepumpe realisiert wird. Hinsichtlich des Raumklimas und dem Heizenergiebedarf sind keine signifikanten, und hinsichtlich des Wärmestroms nur geringfügige, Unterschiede zwischen den Stockwerken zu erkennen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die drei Stockwerke nicht hermetisch voneinander getrennt sind und speziell das 1. OG durch das EG und 2. OG thermisch beeinflusst wird.

Allgemein lässt sich aus den Ergebnissen der Lebenszyklusanalyse und des Gebäudemonitoring ableiten, dass es keine ausschlaggebenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Massivbauweisen gibt. Es sollte jedoch generell Wert auf die Nutzung ökologischer und regionaler Baustoffe, vor allem in Form von nachwachsenden Rohstoffen, gelegt werden, um den lebenszyklusbasierten Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und dem Klimawandel entgegenzuwirken. Auf Grund dessen ist es wichtig, Holz, und andere Kohlenstoff bindende Baustoffe (wie z.B. Schilf oder Stroh) mit in Betracht zu ziehen und zu bewerten. Unter Berücksichtigung der aktuellen digitalen Entwicklung ergeben sich für das

Bauwesen zukünftig Möglichkeiten Kohlenstoff bindende Baustoffe auch aus 3D-Druckern zu generieren. Zusätzlich ist es wichtig das Gebäudemonitoring weiterzuführen, um den Verbrauch unterschiedlicher Jahre zu analysieren und den Einfluss der Baufeuchte nach Errichtung des Gebäudes auf das Raumklima zu reduzieren. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass Gebäude einen wichtigen Beitrag zur Minimierung des Treibhausgasausstoßes und des Energieverbrauchs leisten können. Dieses Potenzial gilt es künftig intensiver zu nutzen und auszubauen. Hierbei zeigt dieses Forschungsprojekt auf wie wichtig die interdisziplinäre Zusammenarbeit bereits im frühen Stadium des Bauprojektes zwischen Forschung und Wirtschaft ist, gerade in Bezug auf den Themenbereich des ressourceneffizienten Bauens.

VI. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Der Neubau Bürogebäude Tausendpfund (Fotoquelle: © Bauer bauerwerner.com)	8
Abbildung 2 Die verschiedenen tragenden Materialien der Außenwände (Fotoquelle: © Bauer bauerwerner.com)	9
Abbildung 3 Schematische Darstellung der gebäudetechnischen Anlagen und deren Kennwerte (eigene Darstellung TU München)	12
Abbildung 4 Lebenszyklusphasen von Gebäuden (Darstellung basierend auf DIN EN ISO 15978:2012, DIN ISO 21500:2016, DIN EN ISO 41011:2019, BGB:2017, BayBO:2018, KrWG:2017, DIN 31051:2003, DIN 18960:2008, BRW-RL:2011, HOAI:2013, VOB/A:2016, WZ2008)	14
Abbildung 5 Gesamtübersicht der Außenwandtypen (eigene Darstellung TU München)	16
Abbildung 6 Flussdiagramm Stahlbetonwand (eigene Darstellung TU München)	18
Abbildung 7 Flussdiagramm Ziegelwand (eigene Darstellung TU München)	19
Abbildung 8 Flussdiagramm Kalksandsteinwand (eigene Darstellung TU München)	20
Abbildung 9 Flussdiagramm Holzständerwand mit Faserzementverkleidung (eigene Darstellung TU München)	21
Abbildung 10 Messung der Vorlauftemperatur (Fotoquelle: © Lehrstuhl ENPB, TU München)	23
Abbildung 11 Schematische Darstellung der Messsensoren zum Energiesystem, Raumklima und der Fassaden (eigene Darstellung TU München)	24
Abbildung 12 Vergleich zwischen dem Nutzenergieverbrauch 2017 und 2018 zu dem prognostizierten Nutzenergiebedarf aus der EnEV Berechnung	27
Abbildung 13 Energieverbräuche für Heizung und Kühlung für die Jahre 2017 und 2018 getrennt für die einzelnen Stockwerke (eigene Darstellung TU München)	28
Abbildung 14 Verlauf der Lufttemperatur für das Jahr 2017	29

Abbildung 15 Verlauf der Lufttemperatur für das Jahr 2018	29
Abbildung 16 Einordnung des thermischen Raumklimas für das Jahr 2017 anhand der Kategorien gemäß DIN EN 15251	31
Abbildung 17 Einordnung des thermischen Raumklimas für das Jahr 2018 anhand der Kategorien gemäß DIN EN 15251	32
Abbildung 18 Übergradstunden drei Stockwerke für 2017 und 2018	32
Abbildung 19 Wärmestrommessplatten außen und innen (Fotoquelle: © Lehrstuhl ENPB, TU München)	33
Abbildung 20 Wärmestrommessplatten innen und außen	35
Abbildung 21 Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände im EG	36
Abbildung 22 Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände im 1.OG	36
Abbildung 23 Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände im 2.OG	36

VII. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Bauteilaufbauten per Werkplanung	9
Tabelle 2 Bauteilaufbau Vergleichswand aus Holz	15
Tabelle 3 Lufttemperaturen des Außenklimas gemäß EnEV Bilanzierung und für die Jahre 2017 und 2018 aus der Wetterstation am FTmehrHaus in Regensburg	25
Tabelle 4 Gesamter jährlicher Nutzenergiebedarf gemäß EnEV Bilanzierung	26
Tabelle 5 Zusammenfassung der Nutzenergie für Heizung, Kühlung und Lüftung für die Bilanzierung gemäß EnEV sowie für das Monitoring in 2017 und 2018	27
Tabelle 6 Skala der Klimabeurteilung	30
Tabelle 7 Kategorien für die Bewertung des Raumklimas für maschinell beheizte und gekühlte Gebäude	30
Tabelle 8 Beschreibung der Raumklimakategorien gemäß DIN EN 15251	31
Tabelle 9 Transmissionswärmeverluste und Innentemperatur pro Stockwerk	34

IMPRESSUM

Ansprechpartner bei der Technischen Universität München
und dem Bayerischen Bauindustrieverband:



Technische Universität München
Fakultät Architektur
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

AUTOREN

Michael Vollmer, M. Sc.
michael.vollmer@tum.de
Tel.: +49 89 289-25754

Dipl.-Ing. Patricia Schneider-Marin
patricia.schneider@tum.de
Tel.: +49 89 289-23983

Hannes Harter, M. Sc.
hannes.harter@tum.de
Tel.: +49 89 289-23969

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
sekretariat.enpb.bgu@tum.de
Tel.: +49 89 289-23990

INDUSTRIEPARTNER

Ferd. Tausendpfund GmbH & Co. KG
Geschäftsführer Michael Thon
Bukarester Str. 1c | 93055 Regensburg
www.tausendpfund.de

ABTEILUNG PROJEKTPLATTFORM ENERGIE + INNOVATION

Dipl.-Ing. Sandro Pfoh
s.pfoh@ppe.tum.de
+49 89 289-28153

ABTEILUNG HOCHBAU UND ENERGIE

Dipl.-Ing. (FH)/MBA & Eng. Werner Goller
w.goller@bauindustrie-bayern.de
+49 89 235003-41



DANK

Das Projekt wurde von der Bayerischen Bauwirtschaft gefördert.

GESTALTUNG

Dipl.-Des. (FH) Daniel Schwaiger

HERAUSGEBER

Bayerischer Bauindustrieverband e.V. (BBIV)
Oberanger 32 | 80331 München
www.bauindustrie-bayern.de

VERLAG

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Arcisstr. 21 | 80333 München
www.ar.tum.de, verlag@ar.tum.de

ISBN 978-3-948278-03-8

© BBIV, 1. Auflage, Dezember 2019

