

Forschungsprojekt - Projektdokumentation

EffTecSo-modIn

Effiziente Technologien unter sozialen Aspekten als modulare Instandsetzungsverfahren

Zuwendungsempfänger: Berliner Hochschule für Technik Fraunhofer IRB IREES Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien Postbaugenossenschaft München und Oberbayern eG	Förderkennzeichen: 03EGB0012A 03EGB0012B 03EGB0012C 03EGB0012D
--	--

Autoren: Prof. Katja Biek (Berliner Hochschule für Technik), Klaus Probst (IRB), Angelika Lückert (IRB),
Dr. Karin Schakib-Ekbatan (IREES), Ulrich Brüggerhoff (Postbaugenossenschaft)

Bearbeitungsstand: 31.12.2023

Luxemburger Str. 10
13353 Berlin
T.: +49 (0)30 4504-2535
E-Mail: biek@bht-berlin.de



Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundtages

Hinweis: Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Kurzfassung

Das Erzielen der klimapolitischen Ziele bezüglich der CO₂-Emissionen von Gebäuden funktioniert nur, wenn man den Gebäudebestand effizienzsteigernd modernisiert. Dazu wird im Rahmen eines Forschungsprojektes an einer thermischen Außenwandaktivierung gearbeitet, welche eine Grundtemperierung des Gebäudes ermöglichen soll. Das Projekt fokussiert sich auf den klassischen Altbau, welcher sich durch die dicken Außenwände (≥ 38 cm) als Untersuchungsobjekt eignet. Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfs von Bestandsgebäuden soll überwiegend durch die Implementierung regenerativer Energiequellen erfolgen. Der Endenergiebedarf wird gesenkt, indem geringere Innenraumlufttemperaturen bei gleichbleibender operativer Raumtemperatur angestrebt werden. Das passiert durch die Anhebung der Oberflächentemperaturen des Raums. Um einen Raum zu beheizen, kann man entweder das Medium Luft direkt aufheizen oder man kann für den Menschen über den Strahlungsaustausch mit wärmeren Oberflächen ein behagliches Klima herzustellen. Je höher der Strahlungswärmeanteil im Raum ist, umso geringer kann die Lufttemperatur sein, was die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste reduziert. Die geringsten Oberflächentemperaturen weisen die Außenluft-berührenden Bauteile auf (Außenwand, Fenster). Die Temperierung der Außenwand hat dadurch einen merkbaren Einfluss auf die Behaglichkeit. Des Weiteren schützt die Außenwandtemperierung den Bestand. Die Taupunkttemperatur wird nicht unterschritten, wodurch die feuchte Raumlucht an der Außenwand nicht kondensieren kann, was Schimmel- und Pilzbildung und eine Schädigung der Bausubstanz vorbeugt.

Im Forschungsprojekt werden vergleichende Messungen und Untersuchungen in einem realen Quartier durchgeführt. Dafür wird ein Raum einer Versuchswohnung mit der thermischen Außenwandaktivierung ausgestattet. Der Nachbarraum wird mit konventionellem Heizkörper beheizt. Verschiedene Messpunkte ermöglichen die Berechnung der benötigten Energiemengen zum Erwärmen des Raumes und die Beurteilung der Behaglichkeit. Außerdem werden verschiedene Temperatur-Szenarien untersucht. Die experimentellen Untersuchungen werden von Modellierungen in Simulationsprogrammen begleitet und durch diese vorbereitet und ausgelegt.

Keywords: Thermische Bauteilaktivierung, LowEx, energetische Bestandssanierung, Bestandsschutz, Treibhausgasneutralität, Energiewendeprozess, Nachhaltigkeitsforschung

Abstract

For reaching goals of climate policy concerning the emission of greenhouse gases, a focus in Germany should be the efficiency increasing modernization of old existing buildings. 90 % of the existing buildings doesn't comply with EnEV-standards. Therefore, the research project „EffTecSo-modIn“ examines modular restorations, which are socially acceptable, simple to operate and which can reduce primary energy consumption. Especially in older existing buildings (construction year 1900 to 1950) with a facade worthy of preservation, it is hard to lower primary energy consumption. That is either due to no possibility of external insulation (preservation order) or the bad integrability of heat pumps. To operate heat pumps in an efficient manner low flow temperatures are needed in the heat transferring system which should consequently has a large area to radiate heat instead of a classic static radiator which needs high flow temperatures.

Long-term weather forecasts like the Test Reference Years from German Meteorological Service show that temperatures in winter and summertime increase. This suggests a downsizing of the heating system and the growing importance of cooling concepts. Motivation also is stronger varying user profiles throughout one residential building. Longer absence of one resident leads to cooling down of the apartment, which can result in damaging the substance and higher heating consumption and costs of other residents, who compensate the transmission heat loss to the neighbouring apartment.

The R&D project examines a thermal activation of the building envelope on low temperature level which supplies a basic temperature and shall provide heat to the building efficiently 98 % of the time of a year. This supports the compatibility using heat pumps and environmental energy. In colder hours an additional heater, which can vary, supports the system.

By heating the coolest areas of the room enclosing surfaces (outer wall) the room air temperature can be lowered whereby the influences on thermal comfort will be observed. This would lead to lower transmission and ventilation heat losses. The basic temperature in the outer walls preserves the building's substance regardless of the user's ventilation and heating behaviour. The higher surface temperatures prevent the condensation of the water vapour (no falling below dew point). The measurements shall show if individual additional heating to ensure the thermal comfort of the user is necessary.

Keywords: Thermal Activation, LowEx, energy-saving renovations, preservation, greenhouse gas neutrality, energy transition, sustainability research

I Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
I Inhaltsverzeichnis	4
II Abbildungsverzeichnis	7
III Tabellenverzeichnis	12
IV Abkürzungsverzeichnis	14
V Symbolverzeichnis	15
Vorwort	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1 Einleitung	16
2 Status Quo	18
2.1 Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik	18
2.2 Energiepolitische Vorgaben (IRB)	20
2.3 Demografischer Wandel (IREES Input, evtl. BPTM Input).....	20
2.4 Struktur des Wohngebäudebestands (IRB).....	24
2.5 Performance Gap (IRB + IREES Input)	27
3 Das Untersuchungsobjekt (BPTM)	29
3.1 Postbaugenossenschaft München und Oberbayern eG	29
3.2 Renatablock	29
4 Grundlagen	33
4.1 Energetische Sanierung im Quartier (IRB).....	33
4.2 Sanierung im bewohnten Zustand (IRB)	34
4.3 Staub auf Baustellen (IRB).....	34
4.4 Lärm auf Baustellen (IRB)	35
4.5 Thermische Behaglichkeit (IRB)	36
4.5.1 Operative Raumtemperatur.....	39
4.5.2 Luftgeschwindigkeit	42
4.6 Thermische Bauteilaktivierung (IRB).....	43
4.7 Materialien für die Bauteilaktivierung.....	44
4.7.1 Heizungsrohre.....	44
4.7.2 Dämmstoffe	47
4.7.3 Füll- und Putzstoffe	49
4.8 Infrarotheizung (IRB)	51
4.9 Nutzerverhalten (IRB)	52
4.10 Sozialwissenschaftliche Aspekte einer Gebäudesanierung (IREES).....	53
4.10.1 Akzeptanz neuer Technologien	54

4.10.2	Erfolgsfaktoren und Hemmnisse der Gebäudesanierung auf Sicht der Nutzenden	55
4.11	Baulogistik.....	55
4.11.1	Bauablaufplanung.....	56
4.11.2	Koordination von Gewerken	58
4.11.3	Infrastrukturelle Anbindung der Baustelle	58
4.11.4	Maßnahmen zur Minderung von Bauschmutz.....	59
4.12	Heizkosten (IRB).....	60
5	Methodik.....	61
5.1	Wissenstransfer im Forschungsvorhaben (IRB)	62
5.1.1	Methodische Darstellung.....	62
5.1.2	Außendarstellung des Projektes.....	62
5.2	Sozialwissenschaftliche Vorgehensweise.....	62
5.3	Technische Bestandsdatenanalyse	63
5.4	Wetterdatenanalyse.....	63
5.5	Simulationen mit CFD.....	64
5.6	Simulationen mit IDA ICE	65
5.7	U-Wert Messung.....	65
5.8	Aufbau der Versuchswohnung.....	68
5.8.1	Schlitzarbeiten und Heizungsinstallation	70
5.8.2	Dauertemperaturmessung	72
5.8.3	Messungen zum Energiebedarf und zur Behaglichkeit	77
5.8.4	Thermografie-Aufnahmen	78
6	Ergebnisse der numerischen und experimentellen Untersuchung.....	80
6.1	Bestandsanalyse.....	80
6.2	U-Wert Messung.....	83
6.3	Wetterdatenanalyse.....	91
6.4	Numerische Simulationen.....	93
6.4.1	CFD-Untersuchung.....	93
6.4.2	Untersuchungen mit IDA ICE	100
7	Ergebnisse Feldversuch / Laborwohnung	106
7.1	Aufbau der Versuchswohnung.....	106
7.1.1	Schlitzarbeiten	106
7.1.2	Heizungsinstallation	112
7.2	Temperaturmessungen und Energiemengenberechnung	115
7.3	Behaglichkeitsmessung.....	132
7.4	Thermografie-Aufnahmen	136
8	Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung (IREES).....	140

8.1	Themen der Interviews	142
8.2	Entwicklung eines Kategoriensystems	142
8.2.1	Sanierungskonzept.....	143
8.2.2	Technische Aspekte.....	144
8.2.3	Raumklima	145
8.2.4	Wohnkomfort.....	146
8.2.5	Sanierungsablauf	146
8.2.6	Zufriedenheitsbewertungen zur Wohnung	147
8.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	148
9	Auswertung und Interpretation der Ergebnisse	150
9.1	Simulation mit IDA ICE	150
9.2	Interpretation der Staubbelastungs-Messungen während der Schlitzarbeiten	161
9.3	Interpretation der Thermografie-Aufnahmen Analyse	162
9.4	Interpretation der Ergebnisse zur Temperaturverteilung und der Energiemengenzählung.....	162
9.5	Interpretation der Messergebnisse zur Behaglichkeit	163
9.6	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Wohngebäudebestand	164
9.7	Klassifizierung der Gebäudeklassen.....	167
9.8	Wirtschaftlichkeit	169
10	Wissenstransfer	172
11	Zusammenfassung und Ausblick.....	173
VI	Literaturverzeichnis	175
VII	Anhänge	182

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Altersaufbau der Bevölkerung, Deutschland 1910 bis 2060 (in Prozent der Gesamtbevölkerung) [6]	21
Abbildung 2: Kohortenwachstumsrate, Schwarmstädte Deutschland 2011-2015 [7]	23
Abbildung 3: Bevölkerung in Deutschland nach Altersgruppen (Statistisches Bundesamt)	24
Abbildung 4: Privathaushalte nach Haushaltsgröße (Statistisches Bundesamt)	24
Abbildung 5: Verteilung (relative Häufigkeit) von Energieverbrauchskennwerten im Wohngebäudebestand in Deutschland [8]	25
Abbildung 6: Anteil der Wärmepumpen im Neubau in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2019 [9]	26
Abbildung 7: Renatablock in München und Positionierung der Referenzwohnung [18]	30
Abbildung 8: Ansichten Renatablock, links [18]	31
Abbildung 9: Ansicht Renatablock und Positionierung der Musterwohnung / Schnitt der Musterwohnung im 3. OG links	31
Abbildung 10: Grundriss Renatablocks und der Musterwohnung im 3. OG links	32
Abbildung 11: PMV- und PPD-Werte im Verhältnis [41].....	39
Abbildung 12: Prozentsatz an Unzufriedenen bei asymmetrischer Strahlungstemperatur [44]	41
Abbildung 13: Behaglichkeitsfeld Strahlungs-/Raumlufttemperatur [46]	42
Abbildung 14: Bauteil der Außenwand: a) Schnitt mit Wandaktivierung und b) Wärmestrahlung vom Bauteil in den Raum.....	43
Abbildung 15: Rohrgeometrie [63].....	46
Abbildung 16: Biegeschenkel beim a) L-Bogen und b) U-Bogen	47
Abbildung 17: Vorlage zur Erläuterung von a) Konvektionsheizung und b) Flächenheizung im Vergleich [81].....	53
Abbildung 18: Altersstruktur Renatablock [82].....	54
Abbildung 19: Baulogistikprozessmodell [84]	56
Abbildung 20: Ablauf der Baustelleneinrichtungsplanung im Überblick [85]	57
Abbildung 21: Bauablaufplanung Versuchswohnung.....	58
Abbildung 22: Übersicht der Arbeitspakete.....	61
Abbildung 23: Verschiedene Leitungsverläufe in CFD	64
Abbildung 24: Messprinzip Temperaturmethode, Quelle: Katja Biek, BioClima	66
Abbildung 25: Schema technischer Aufbau Versuchswohnung	69
Abbildung 26: Doppelnutfräse mit Staubsauger	71
Abbildung 27: Lüftungsgerät mit Abluftschlauch	71
Abbildung 28: Staubmessgerät (Positioniert im Wohnzimmer außerhalb der Staubschutzwand).....	71
Abbildung 29: Staubschutzwand.....	71
Abbildung 30: Messraster Wohnzimmer Draufsicht	73
Abbildung 31: Messraster Wohnzimmer Seitenansicht	74

Abbildung 32: Aufbau Raster-Temperaturmessung	75
Abbildung 33: Grundriss Messraster Schema 2 (Heizperiode 2020/21), rechts: Schnitt Messraster	76
Abbildung 34: Anordnung Oberflächentempersensoren	77
Abbildung 35: Thermografie Außenfassade, Bildausschnitt 3 x 3 Fenster	78
Abbildung 36: Thermografie Außenfassade, Bildausschnitt 2 x 2 Fenster	78
Abbildung 37: Markierung Kameraposition (links: Schlafzimmer, rechts: Wohnzimmer) ..	79
Abbildung 38: Rotes Kreuz zur Kameraausrichtung	79
Abbildung 39: Wandaufbau des Untersuchungsobjekts	81
Abbildung 40: Wandaufbau des Untersuchungsobjekts mit dem U-Wert	81
Abbildung 41: Grundriss Versuchswohnung	82
Abbildung 42: Thermografie-Aufnahme: Ansicht der Fassade des Untersuchungsobjekts	82
Abbildung 43: Messaufbau U-Wert-Messung	84
Abbildung 44: Temperaturverlauf der Datenlogger	85
Abbildung 45: Auswertung der Messdaten	86
Abbildung 46: Thermografie Messstelle T2 Außenwand Ost/ Wohnzimmer, Zeitpunkt: 10.05.2019 um 07:42 Uhr	88
Abbildung 47: Thermografie Messstelle T2 Außenwand Ost/ Wohnzimmer, Zeitpunkt 10.05.2019 um 09:28 Uhr	88
Abbildung 48: Thermografie Messstelle T4 Außenwand West/ Küche, Zeitpunkt 10.05.2019 um 09:29 Uhr	89
Abbildung 49: Thermografie Messstelle T4 Außenwand West/ Küche, Zeitpunkt 10.05.2019 um 09:29 Uhr	89
Abbildung 50: Links: Materialfeuchtegehalt Außenwand Ost/ Wohnzimmer; rechts: Materialfeuchtegehalt Außenwand West/ Küche	90
Abbildung 51: Jahresdauerlinie der Testreferenzjahre, Standort München	92
Abbildung 52: Tagesgemittelte Außenlufttemperatur der beiden Testreferenzjahre, Standort München	92
Abbildung 53: Voruntersuchung, links mit Dämmung hinter den Rohren, rechts ohne Dämmung	94
Abbildung 54: Erste Modelle der Leitungsintegration für die Außenwandaktivierung	95
Abbildung 55: Wandausschnitt für CFD-Untersuchung mit Parametervariationen	95
Abbildung 56: Variationen der Leitungsführung	98
Abbildung 57: Simulation der realisierten Leitungsausführung: a) ohne und b) mit optionaler Zusatzheizschleife	98
Abbildung 58: 3D Modell und Schnitt des Versuchsraumes	100
Abbildung 59: 3D Modell und Schnitt der Renata Straße 17	101
Abbildung 60: 3-D-Modelle der Renatastr. 17 mit Verschattungselementen	101
Abbildung 61: U-Werte der Bauteile für den Versuchsraum	102
Abbildung 62: Innenansicht der Außenwand im Wohnzimmer mit Heizfläche	103
Abbildung 63: Zeitprofile der Beleuchtung, Geräte und Raumbelugung durch Personen.	105

Abbildung 64: Leitungsführung Versuchswohnung	106
Abbildung 65: Testschlitz nach Mauernutfräse	107
Abbildung 66: Testschlitz nach Stemmen.....	107
Abbildung 67: Freigelegtes Mauerwerk, Außenwand, bestehend aus Ziegel und Kalksandstein.....	108
Abbildung 68: Handwerker beim Ausführen der Schlitzarbeit.....	109
Abbildung 69: Schlitze nach Mauernutfräse.....	109
Abbildung 70: Staubmessgerät (positioniert im Flur, während die Schlitzarbeiten ohne Staubschutzwand durchgeführt werden, ausschließlich mit Folie im Zimmereingang (jedoch nicht abgedichtet)	110
Abbildung 71: Schlitze nach Stemmarbeit.....	111
Abbildung 72: Entstehender Abfall (Schutt).....	111
Abbildung 73: Abbau der Staubschutzwand.....	111
Abbildung 74: Rahmen der Staubschutzwand	111
Abbildung 75: Einlegen des Rehau Rautherm S Rohres; Einlegen des Rehau Rautherm S Rohres; Fixierung der Rohrbögen	112
Abbildung 76: Tauchhülsen für Temperatursensoren; Volumenstromsensoren; Gesamtansicht nach Leitungsinstallation vor Verputzen.....	113
Abbildung 77: Schlafzimmer; Fenster; Heizkörper	114
Abbildung 78: Innentür mit Armaflex	115
Abbildung 79: Übersicht Verläufe aller Datenlogger	116
Abbildung 80: Vergleich der Räume, Messpunkte in Raummitte	117
Abbildung 81: Messpunkte rechts vom Fenster in 30 cm Entfernung zur Außenwand.....	117
Abbildung 82: Messpunkte rechts vom Fenster in 100 cm Entfernung zur Außenwand...	118
Abbildung 83: Kennzeichnung Messstellen im Messraster Schema 1 (links: Draufsicht, rechts: Schnitt).....	118
Abbildung 84: Horizontaler Temperaturverlauf rechts vom Fenster auf einer Höhe von 1,30 m.....	119
Abbildung 85: Darstellung der Verteilung der im Mittel gemessenen Temperaturen auf der mittleren Messebene (Ebene 2) des Monats März 2020 im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts)	119
Abbildung 86: Leistungswerte der Heizung und die theoretische Heizlast beider Räume	120
Abbildung 87: Vorlauf-, Raum- und Außentemperaturen März 2020.....	121
Abbildung 88: Links: Grundriss Messraster Schema 2 (Heizperiode 2020/21), rechts: Schnitt Messraster.....	123
Abbildung 89: Polystyrol-Verkleidung der Zuleitungen (links) mit Thermografie- Aufnahme (rechts)	123
Abbildung 90: Vertikaler Temperaturverlauf Raummitte Wohnzimmer Reihe 7	125
Abbildung 91: Vertikaler Temperaturverlauf Raummitte Schlafzimmer Reihe 5	125
Abbildung 92: Temperaturverläufe in der mittleren Ebene im Wohnzimmer (Ebene 2)...	126
Abbildung 93: Temperaturverläufe in der mittleren Ebene im Schlafzimmer (Ebene 2) ..	126

Abbildung 94: Temperaturverläufe Messsäule R2 (MXX/02) im Raum mit temperierter Außenwand November 2020	127
Abbildung 95: Temperaturverläufe Messsäule R2 (MXX/02) im Raum mit temperierter Außenwand Januar 2021	127
Abbildung 96: Darstellung der Verteilung der im Mittel gemessenen Temperaturen auf der mittleren Messebene (Ebene 2, 1,3 m vom Fußboden) des Monats Januar 2021 im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts).....	128
Abbildung 97: Temperaturverläufe aller im Raum mit Heizkörper befindlichen Datenlogger am 21. Januar 2021	129
Abbildung 98: Temperaturverläufe gesamte Heizperiode 2020/21	129
Abbildung 99: Leistungsverläufe für die Heizperiode 2020/21	130
Abbildung 100: Skizze der Messpunkte an der Außenwand (Wohnzimmer).....	131
Abbildung 101: Wandoberflächentemperaturen mit Lufttemperaturen im Versuchsraum	132
Abbildung 102: Vergleich der gemessenen Außenlufttemperatur mit den Messdaten vom DWD.....	132
Abbildung 103: Luftgeschwindigkeitsmessung mit Hitzdrahtanemometer	133
Abbildung 104: Verlauf Globetemperaturen raummittig Wohn- und Schlafzimmer	134
Abbildung 105: Versuchsraum mit Globesensoren in Raummitte.....	135
Abbildung 106: Vergleich Lufttemperatur (Datenlogger) mit Strahlungstemperatur mit Außenlufttemperatur.....	136
Abbildung 107: Thermografie-Aufnahme (links: konventionell beheizter Referenzraum, rechts: Außenwandaktivierung).....	136
Abbildung 108: Thermografie-Aufnahme Wohnzimmer Außenwand (innen, linke Fläche vom Fenster); Thermografie-Aufnahme Wohnzimmer Außenwand (innen, linke Fläche vom Fenster); Thermografie-Aufnahme Schlafzimmer Außenwand (innen).....	137
Abbildung 109: Thermografie-Aufnahme der Außenfassade 15.02.2021	137
Abbildung 110: Thermografie-Aufnahme der Außenwand von Innen (Schlafzimmer) 15.02.2021	138
Abbildung 111: Thermografie-Aufnahme der Außenwand von Innen (Wohnzimmer) 15.02.2021	139
Abbildung 112: Vorlage zur Einstufung der Zufriedenheit	141
Abbildung 113: Wortwolke zu den analysierten Audiofiles	142
Abbildung 114: Abgeleitete Hauptkategorien aus den Interviewtranskripten	143
Abbildung 115: Verteilung der Zufriedenheitsbewertungen zu Heizung und Wohnung ..	148
Abbildung 116: Regelung der Vorlauftemperatur (y-Achse) in Abhängigkeit der Außentemperaturen (x-Achse)	159
Abbildung 117: Detailaufnahme Schlitz; Entstehender Abfall (Schutt); Gesamtansicht Wohnzimmer-Außenwand mit Schlitz	162
Abbildung 118: Vollziegel im Reichsformat	
Abbildung 119: Vollziegel Format im Renatablock	164
Abbildung 120: Wohnhaus Bautyp Altbau 1950 deckentragende Längswände mit 38-65 cm Außenwanddicken	165

Abbildung 121: Gesamtzahl der Gebäude nach Bauart 1850- 1968.....	166
Abbildung 122: Übersicht der Gebäudeklassen (© Cornelia Halbach)	168

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wanderungsarten	22
Tabelle 2: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala [40]	38
Tabelle 3: Rohrmaterialien für die Außenwandaktivierung.....	45
Tabelle 4: Dämmstoffe für die Außenwandaktivierung.....	48
Tabelle 5: Technische Parameter der Putzsysteme [72].....	50
Tabelle 6: Variationen der Sollinnentemperaturen in den beiden Testräumen	69
Tabelle 7: Übersicht der Datenlogger Messraster Wohnzimmer (Schema 1: Heizperiode 2019/20).....	74
Tabelle 8: Wandoberflächentemperaturmessung im Wohnzimmer.....	76
Tabelle 9: Bauteildaten aus Solarcomputer.....	80
Tabelle 10: Übersicht der Datenlogger	84
Tabelle 11: Mittelwerte Temperaturen Datenlogger.....	85
Tabelle 12: Mittelwerte Temperaturen Datenlogger.....	86
Tabelle 13: Vergleich ermittelter U-Werte bei angenommenen Lufttemperaturwerten von Datenlogger und Testo 635.....	87
Tabelle 14: Ermittelte U-Werte verschiedener Oberflächentemperaturen Außenwand West (Küche).....	89
Tabelle 15: Übersicht der Wetterdatenanalyse (Prof. K. Biek, EffTecSo-modIn).....	93
Tabelle 16: Parametervariation	97
Tabelle 17: Ergebnisübersicht der Simulationen zu der realisierten Leitungsausführung...99	
Tabelle 18: Norm-Innentemperaturen der unterschiedlichen Räume	103
Tabelle 19: Primärenergiefaktoren unterschiedliche Energieträger.....	104
Tabelle 20: Bewertungsskala des Wärmeempfindens.....	104
Tabelle 21: Verlauf Probeschlitzung.....	108
Tabelle 22: Verlauf der Schlitzarbeit in Staubschutzbereich rechte Seite	108
Tabelle 23: Verlauf der Schlitzarbeit linke Seite (außerhalb der Staubschutzwand).....	110
Tabelle 24: Ergebnistabelle Monat März.....	121
Tabelle 25: Zeitliche Mittelung der Vor- und Rücklauftemperaturen im Monat März 2020	122
Tabelle 26: Ergebnistabelle Wärmemenge November 2020.....	124
Tabelle 27: Zeitlich gemittelte Vorlauf- und Rücklauftemperatur für den Monat November 2020	124
Tabelle 28: Gemittelte Temperaturen und relative Luftfeuchtigkeit für den Monat November	124
Tabelle 29: Ergebnistabelle gesamte Heizperiode 2020/21	130
Tabelle 30: Messwerte 27.02.2020 Luftgeschwindigkeit	133
Tabelle 31: Messwerte Luft-/Globetemperaturen 27.02.2020, 10:00 Uhr	134
Tabelle 32: Beschreibung der Stichprobe	140

Tabelle 33: Wohnungsgrößen der befragten Haushalte	140
Tabelle 34: Subcodes zur Kategorie Sanierungskonzept	143
Tabelle 35: Subcodes zur Kategorie Technische Aspekte/Fragen	144
Tabelle 36: Subcodes zur Kategorie Raumklima	145
Tabelle 37: Subcodes zur Kategorie Wohnkomfort	146
Tabelle 38: Äußerungen zur Kategorie Sanierungsablauf	146
Tabelle 39: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2015.....	150
Tabelle 40: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2045.....	150
Tabelle 41: Temperaturschlüsselwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2015	151
Tabelle 42: Temperaturschlüsselwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2045	151
Tabelle 43: Solarertrag und Tageslichtintensität für das TRY 2015 und TRY 2045	152
Tabelle 44: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme für den Wohnblock, TRY 2015.....	153
Tabelle 45: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme für den Wohnblock, TRY 2045.....	154
Tabelle 46: Endenergiebedarf der Renatastr. 17 mit und ohne Verschattung.....	155
Tabelle 47: Temperaturschlüsselwerte der Varianten 1 und 2	157
Tabelle 48: Energetische Kennwerte aller drei Varianten, TRY 2015.....	160
Tabelle 49: Energetische Kennwerte aller drei Varianten, TRY 2045.....	160
Tabelle 50: Temperaturschlüsselwerte aller drei Varianten.....	161
Tabelle 51: Kostenberechnung.....	170

IV Abkürzungsverzeichnis

a. a. O. = am angegebenen Ort

Bd. = Band (z. B. bei mehrbändigen Lexika)

ders. = derselbe Autor (bei Aufzählung mehrerer Werke desselben Autors)

d. h. = das heißt

ebd. = ebenda (bei mehrmaligem Zitieren derselben Seite)

f. = die angegebene und die folgende Seite (S. 384 f. = S. 384 und 385)

ff. = die angegebene und die beiden folgenden Seiten (S. 384 ff. = S. 384 bis 386)

Hrsg. = Herausgeber

hrsg. v. = herausgegeben von

o. O. = ohne Ortsangabe

o. J. = ohne Jahresangabe

S. = Seite

Sp. = Spalte

s. = siehe

u. a. = und andere

usw. = und so weiter

vgl. = vergleiche

V Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Dimension
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m ²
U	Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert	W/(m ² ·K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
λ_n	Wärmeleitfähigkeit der Schicht n	W/(m·K)
θ_o	Operative Temperatur	°C
θ_e	Norm-Außentemperatur	°C
θ_i	Norm-Innentemperatur des beheizten Raums	°C
θ_{iW}	Temperatur Wand, innen	°C
θ_{eW}	Temperatur Wand, außen	°C
θ_{VL}	Vorlauftemperatur	°C
θ_r	Mittlere Strahlungstemperatur	°C
θ_M	Mediumtemperatur	°C
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² ·K)
α_i	Wärmeübergangskoeffizient, innen	W/(m ² ·K)
α_a	Wärmeübergangskoeffizient, außen	W/(m ² ·K)
α_K	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² ·K)
α_S	Langwelliger Strahlungswärmeübergangskoeffizient	W/(m ² ·K)
d	Durchmesser	m
d_i	Innendurchmesser des Mediumrohrs	m
d_a	Außendurchmesser der äußersten Schicht	m
$d_{i,n}$	Innendurchmesser der Schicht n	m
$d_{a,n}$	Außendurchmesser der Schicht n	m
L	Rohrlänge	m
$L_{A,L}$	Biegeschenkelänge	m
$L_{A,U}$	Ausladenlänge	m
Δl	Wärmedehnung	m
s	Wandstärke	m
v	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
C_L	Werkstoffkonstante	o.D.

1 Einleitung

Im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung sind klare Ziele gesetzt und durch die Neuerungen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) wurden die Zeitabschnitte für die Umsetzung verkürzt. Der Gebäudebestand soll nach der Festlegung des GEGs vom 1. Januar 2023 bereits im Jahr 2045 klimaneutral werden. Die Treibhausgasemissionen sollen bis zum Jahr 2045 gegenüber dem Basisjahr 1990 um 88% reduziert werden. [1] Außerdem soll bis zum Jahr 2050 eine Verminderung des Primärenergieverbrauchs um 80% gegenüber dem Basisjahr 2008 erfolgen. Die Änderungen des GEG ab dem 1. Januar 2023 schreiben dazu vor, dass es ab dem 1. Januar 2024 neue Anforderungen an die Anlagentechnik in Gebäuden gibt. Ab 2024 dürfen nur noch Wärmeerzeuger eingebaut werden, die mit mind. 65% aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Weiterhin gilt, dass Stadt-Quartier-Gebäude energieeffizient miteinander zu verknüpfen sind. In der Bekanntmachung: „Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045“ im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms liegt der Fokus auf Abbau von Hemmnissen und Einführung von Innovationen. Für die Erreichung der Ziele sind Projekte erforderlich, die maßgeblich zum Erfolg der Energiewende beitragen. Das Erzielen der klimapolitischen Ziele bezüglich der CO₂-Emissionen von Gebäuden funktioniert außerdem nur, wenn man den Gebäudebestand effizienzsteigernd modernisiert.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist also die Reduzierung der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfs von Bestandsgebäuden. Das soll überwiegend durch die Implementierung regenerativer Energiequellen erfolgen. Der Endenergiebedarf soll gesenkt werden, indem geringere Innenraumlufttemperaturen bei gleichbleibender operativer Raumtemperatur und Behaglichkeit angestrebt werden. Das passiert durch die Anhebung der Oberflächentemperaturen des Raumes. Umgesetzt wird das durch eine thermische Außenwandaktivierung, welche eine Grundtemperierung des Gebäudes ermöglichen soll. Die Wände werden mit einer relativ geringen Vorlauftemperatur beheizt, was für die Energieversorgung den Einsatz von Wärmepumpen und dadurch die Nutzung von Geo- oder Solarthermie begünstigt, beziehungsweise effizient realisieren lässt. Die Außenwandtemperierung bietet dadurch eine gute Schnittstelle zur Niedertemperatur-Solarthermie.

Des Weiteren schützt die Außenwandtemperierung den Bestand. Die Taupunkttemperatur wird an der Wandoberfläche nicht unterschritten, wodurch die feuchte Raumluft an der Außenwand nicht kondensieren kann, was Schimmel- und Pilzbildung und eine Schädigung der Bausubstanz zur Folge hätte. Eine trockene Außenwand minimiert zusätzlich die Wärmeleitfähigkeit, was einen besseren U-Wert nach sich zieht.

Die systematische und zielgerichtete Forschung und Entwicklung verknüpft bestehende Techniken und Energieinnovationen in der Art, dass entwickelte Technologien „neue“ Einsatzfelder finden. Die teilweise hemmenden Regularien werden mit untersucht und bewertet. Es wird so beispielhaft eine Methode entwickelt, die einen interdisziplinären und transdisziplinären Ansatz, unter ökologischen und ökonomischen Fragestellungen berücksichtigt. Die Integration erneuerbarer Energien in die Bestandsimmobilien erfordern neue systemische Strukturen, Techniken und Betreibermodelle. Die thermische Bauteilaktivierung wird überwiegend im Neubau eingesetzt, indem zum Beispiel beim Gießen der Stahlbeton-Geschossdecken wasserführende Leitungen integriert werden. Im Vorhaben sollen die dicken und massiven Außenwände eines Altbaus geschlitzt werden.

Auflistung der zentralen Untersuchungsfragen:

- Energiebedarf der thermischen Außenwandaktivierung
- Beurteilung der Behaglichkeit (kann eine höhere Behaglichkeit erreicht werden, da höhere Oberflächentemperatur der Außenwand)
- Vergrößerung der Aufenthaltszone
- Machbarkeitsanalyse (Baulogistische Realisierbarkeit)
- Wirtschaftlichkeit
- Anpassung der Heizsysteme an Grundheizung und Bedarfsheizung (Grundtemperierung des Quartiers durch eine thermisch aktivierte Außenwand)
- Möglichkeit der Einbindung von Umweltwärme
- Kriterium „Nutzer“ = Alter, Familienstand, Arbeit, etc.
- Bestandsschutz des Gebäudes

Eigenschaften der untersuchten thermischen Außenwandaktivierung

- Rohre nahe der Raumseite der Außenwand
- Keine Außendämmung

Zur Untersuchung der Fragestellungen werden Dauermessungen in einem Versuchsaufbau in einer Wohnung durchgeführt. Begleitend dazu erfolgt eine umfassende Literaturrecherche und es wird unter anderem über Mieter Befragungen die soziale Akzeptanz untersucht.

2 Status Quo

Folgendes Kapitel sollen allgemeine Ziele und die Motivation des Forschungsprojektes beschreiben.

2.1 Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik

Schwerpunkt der meisten energetischen Sanierungen sind die passiven energieeinsparenden Maßnahmen wie Wärmedämmung der Außenhülle, der Einbau energieeffizienter Fenster und Türen sowie die aktive Energieeinsparung durch den Einbau moderner Heizungssysteme. Im Rahmen der energetischen Ertüchtigung von Quartierswohnungen steht bei diesem Vorhaben der innovative Ansatz der Grundtemperierung der Räume mittels Außenwandtemperierung bei Bestandsbauten (klassischer Altbau, Baujahr zwischen 1900 und 1950) im Fokus. Hierdurch kann die passive energieeinsparende Maßnahme der Wärmedämmung mit der aktiven Maßnahme des Heizsystems verschmolzen werden. Die entsprechend dicken vorhandenen Außenwände begünstigen diesen Ansatz. Über eine nachträgliche Verlegung von Leitungen in den Außenwänden wird dem Raum über die Wände Wärme zugefügt; Ziel ist in den Räumen eine konstante Grundtemperatur zu gewährleisten. Anders als bei vorangegangenen Projekten wird hier die Außenwand auf der Innenseite betrachtet; Übertragung des Prinzips der Betonkernaktivierung auf Bestandswände mit einer Stärke > 35 cm. Ziel ist auf eine Außenwanddämmung zu verzichten (relevant u.a. bei denkmalgeschützten Gebäuden). Im Rahmen des „EffTecSo-modIn“ Projekts werden in der ersten Phase die Konzeption der Varianten der Installationen untersucht und für Vorversuche vorbereitet. Ein Aspekt ist hierbei die Lage der Rohrleitungen und die Temperaturen (Vorlauf / Rücklauf). In diesem Projekt sind die Rohrleitungen „nahe“ der Innenseite. Eine Fragestellung ist, inwiefern sich die Außenwandheizung auf den Energieverbrauch des Bestandsgebäudes auswirkt und wie der Anteil der erneuerbaren Energien an der Wärmeversorgung erhöht werden kann. Ausschlaggebend für die Heizlast sind die Raumlufttemperatur und die Temperatur der Außenwand. Der Wärmestrom durch die Außenwand Φ_{Hz} wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten des Wandmaterials, der Temperaturdifferenz zwischen der Wandoberflächentemperatur Innen, und Außentemperatur, sowie der Wandstärke und Fläche A bestimmt. Bei einer thermisch aktiven Wand ist die Innenwandtemperatur im Auslegungsfall höher als bei einer nicht aktivierten Wand. Folglich wird der Wärmestrom durch die Außenwand (Transmissionsverlust) erhöht. Dieser Verlust muss entsprechend kompensiert werden. Neben der Raumlufttemperatur (anzusetzende Temperatur im Rahmen der Heizlastberechnung nach (DIN EN 12831) ist die operative Temperatur θ_{Op} maßgeblich für die Bestimmung der Behaglichkeit im Raum selbst.

Ohne thermisch aktivierte Außenwand wird der Nutzer den Raum tendenziell „überheizen“. Das heißt, um die gewünschte operative Raumtemperatur zu erreichen wird die Raumlufthtemperatur angehoben und ist somit im Vergleich zur Raumlufthtemperatur mit Außenwandheizung höher. Hieraus resultiert ein erhöhter Energiebedarf (ca. 6 % je 1 °C Temperaturerhöhung). Maßgeblich für die Kompensation des erhöhten Bedarfs ist die Art der Wärmequelle. Aus den Ergebnissen der vorgenannten Abschätzungen und den Erkenntnissen aus den FuE-Projekten LEXU [2] und GeoSol [3] sind die Energieflüsse der Kombinationen von verschiedenen Energiequellen maßgeblicher Faktor der Einsparpotentiale. In dem beschriebenen Projekt sollen einfache und kostengünstige Verfahren entwickelt werden, die modular aufgebaut werden können und weitestgehend das Einsparziel von 80% erreichen. Als Energiequellen könnten folgende Quellen zum Einsatz kommen (Primärenergiefaktoren 2016):

- Nah-/Fernwärme aus KWK/Heizkraftwerken mit erneuerbarem Brennstoff: 0,0 (München 2005: 0 – 0,39) [4]
- Solarenergie: 0,0
- Umgebungswärme/Geothermie: 0,0

Rechnerisch wird, je nach Ansatz der Wandinnentemperatur und der operativen Temperatur, ein Großteil der Heizlast durch die Außenwandheizung abgedeckt. Die individuelle „Wohlfühltemperatur“ der Mieter muss durch eine entsprechend ausgelegte Zusatzheizung um einige Grad anpassbar sein.

Zusätzlich könnten die Außenwandheizungen in den Sommermonaten bei langanhaltenden Hitzeperioden noch als passive Kühlung fungieren. Bei Nutzung von Geothermie könnte die an die Rohrleitungen abgegebene Wärme das Erdreich im Sommer thermisch regenerieren.

Die Modularität wird mehrfach untersucht und realisiert: Die Temperierung der Außenwand erfolgt in modularer Bauweise (Untersuchung verschiedener Verlegetechniken und Materialien) und mittels modularen Systemen (Wandheizung und individuell regelbare Zusatzheizung). Bereits vorliegende Forschungsergebnisse wie „LEXU“ befassen sich ebenfalls mit Außenwandheizsystemen. In diesem Projekt wird die Wandheizung auf die Außenwand unterhalb der Dämmung angebracht. Des Weiteren werden hier Kapillarsysteme untersucht. Ein Teilergebnis des Arbeitspaketes 1b ist, dass bei Verwendung von geothermaler Energie die Energieeinsparungen relativ gering sind; Vergleich mit klassischer 14 cm dicker Wärmedämmung an der Außenwand. In dem Projekt „GeoSol“ wiederum werden optimierte Energieflüsse zwischen Geothermie und Solarthermie untersucht. Eine der wesentlichen Neuerungen des beantragten Projektes ist die Grundtemperierung nur über die Außenwand abzudecken und dem Nutzer die individuelle Nachtemperierung zu ermöglichen. Heizkosten spielen nach der Energiekrise auch bei Mietern

eine wesentliche Rolle. Der Heizbedarf und die Wärmequelle werden zukünftig bei Mietentscheidungen immer stärker ins Gewicht fallen. Die soziale Akzeptanz nachhaltiger Gebäudekonzepte im Bestandswohnungsbereich ist insgesamt noch wenig erforscht. Wesentliche Transferhemmnisse sind auch in den regulatorischen Vorgaben und den oftmals sehr komplexen technischen Systemen und Regelstrategien zu finden. Für eine erfolgreiche Umsetzung der klimapolitischen Ziele gilt es, einfache, handhabbare und bedienerfreundliche Systeme zu realisieren. Zusätzlich schreibt das GEG die Pflicht zur Nutzung von erneuerbaren Energien bei bestehendem öffentlichem Gebäude vor. [5]

Eine Problemstellung, die sich unter anderem aus der Globalisierung ergibt, bei Wohn- und Geschäftsgebäuden, sind die abweichenden bzw. variierenden Nutzerprofile. Auch die Umnutzung bestehender Gebäude erfordert eine Anpassung der Gebäudetechnik, welche unter Umständen auch eine zeitlich variable Nutzung ermöglicht.

2.2 Energiepolitische Vorgaben (IRB)

Der Veränderungsprozess durch knapper werdende Ressourcen und steigende Anforderungen an den Klimaschutz und CO₂-Einsparung ist spürbar durch die steigenden Preise bei allen Energieträgern. Unternehmen aus Industrie, Gewerbe und Wohnungswirtschaft können sich dieser Entwicklung nicht entziehen und müssen mit energieeffizienten Gebäuden gegensteuern. Ca. 21 Mio. Gebäude in Deutschland sind in den nächsten 30 bis 35 Jahren energetisch zu modernisieren – was einer jährlichen Investition von erheblich mehr als 100 Milliarden Euro bedarf.

Erstes und wichtigstes Ziel der Energieforschungspolitik ist der Beitrag zur Erfüllung der zahlreichen energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Vorgaben der Bundesregierung. Das zweite Ziel ist es, führende Position deutscher Unternehmen auf dem Gebiet moderner Energietechnologien auszubauen und das dritte Ziel ist die Sicherung und Erweiterung technologischer Optionen, wodurch eine Verbesserung der Flexibilität der Energieversorgung Deutschlands erreicht werden soll.

2.3 Demografischer Wandel (IREES Input, evtl. BPTM Input)

Im zweiten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts setzt sich der weltweite demografische Wandel fort. Je nach Ausmaß der Nettozuwanderung, würde die Bevölkerungszahl in Deutschland bis 2060 deutlich zurückgehen. Die Prognose setzt eine geringere Geburtenziffer von 1,4 Kindern pro Frau, eine erhöhte durchschnittliche Lebenserwartung bis 2060 (auf 84,8 Jahre bei Männern und 88,8 Jahre bei Frauen) und eine langfristige Nettozuwanderung von 100.000 (geringere Zuwanderung) bzw. 200.000 (höhere Zuwanderung) voraus. Tre-

ten die Annahmen ein, schrumpft die Bevölkerungszahl je nach Ausmaß der Nettozuwanderung bei schwächerer Zuwanderung auf rund 67,6 Millionen und bei stärkerer Zuwanderung auf rund 73,1 Millionen. Das würde einen Rückgang um 14 bzw. 8 Millionen Menschen gegenüber der Bevölkerungszahl des Jahres 2014 von 81,2 Millionen bedeuten. Die Geburtenrate, Sterblichkeitsrate sowie die Wanderungstrends sind unter anderen Faktoren jene, die signifikante Veränderungen in der Altersstruktur der Bevölkerung verursachen, und sind somit entscheidend für die zukünftige Bevölkerungsentwicklung.

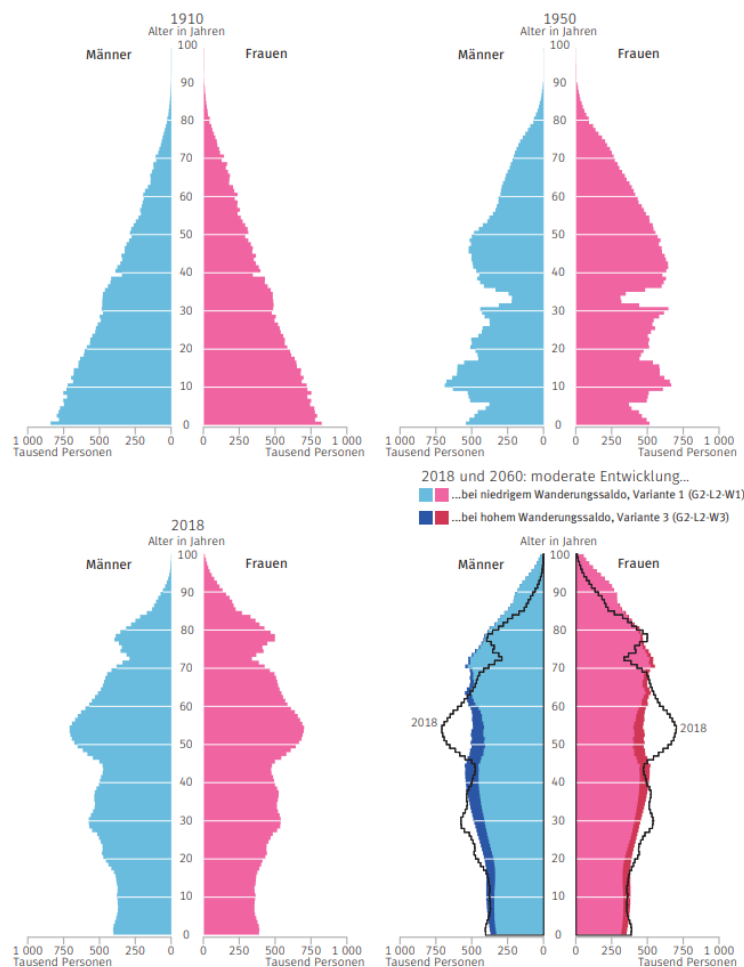


Abbildung 1: Altersaufbau der Bevölkerung, Deutschland 1910 bis 2060 (in Prozent der Gesamtbevölkerung) [6]

Abbildung 1 zeigt die enorme Veränderung der Altersstruktur über die Jahre und zeigt auch eine Prognose für das Jahr 2060. Die Statistik zeigt, dass zur Kaiserzeit 1910 eine gleichförmige Abnahme der Anzahl der Lebenden in der Bevölkerung mit steigendem Alter. Im Jahr 1950 wird der Jugendsockel langsam kleiner und ein tiefer Einschnitt durch die beiden Weltkriege und die Weltwirtschaftskrise wird ebenfalls festgestellt. Heute sind besonders die immer geringer werdenden Zahlen jüngerer Altersgruppen und die

stark besetzten „Babyboomer“ Generationen (Geburtsjahrgänge Ende der 1950er bis Beginn der 1970er Jahre) auffällig. In den nächsten Jahrzehnten wird sich der Trend fortsetzen und der Bevölkerungsalterungsprozess wird sich in Deutschland verstärken.

Die Bevölkerung sortiert sich innerhalb Deutschlands um. In einigen Regionen und Städten wächst die Zahl der Einwohner, in anderen sinkt sie. So lässt sich ein „verändertes Wanderungsmuster“ feststellen, welches als „Schwarmverhalten“ bezeichnet wird und soll durch ein Maß, dessen Kern eine Kohortenanalyse ist, beschrieben werden. Die kumulierte Kohortenwachstumsrate stellt somit einen Entwicklungswert dar, welcher aussagt wie hoch die Veränderung der Einwohnerzahl an einem definierten Ort, in einer definierten Altersklasse nach einer Bezugsgröße von 5 Jahren ist. Ein hohes Kohortenwachstum kann sich aber aus unterschiedlichen Wanderungsarten zusammensetzen.

Tabelle 1: Wanderungsarten

Ausbildungswanderung	10 bis < 20 Jahre
Berufsanfängerwanderung	20 bis < 30 Jahre
Settlementwanderung	30 bis < 40 Jahre
Mittelalterwanderung	40 bis < 55 Jahre
Altenwanderung	50 bis < 70 Jahre

Die im August 2017 veröffentlichte Folgestudie von Empirica zeigt in Bezug auf die Schwarmstädte, dass vor allem die Abwanderung junger Menschen bereichsübergreifend eine Herausforderung darstellt. Weiterhin übersteigt die Anzahl der Geburten die Anzahl der Sterbefälle.

In der Konsequenz vereinsamen Landregionen und die vorhandene Kultur stirbt aus. Demgegenüber stehen Schwarmstädte, die Schwierigkeiten haben, die wachstumsbedingten Auswirkungen zu kompensieren. Vorhandene Auswirkungen, wie steigende Mieten durch Wohnungsknappheit oder die Frage nach verfügbaren Grundstücken für erforderlichen Wohnungsbau sind die direkte Folge der Überfüllung der Städte.

Die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung hinsichtlich der Energieeffizienz und dem ressourcenschonenden Einsatz und Umgang mit Energien erfordern nachhaltige Konzepte für die Instandsetzung und Sanierung von Gebäuden (baulich und technisch).

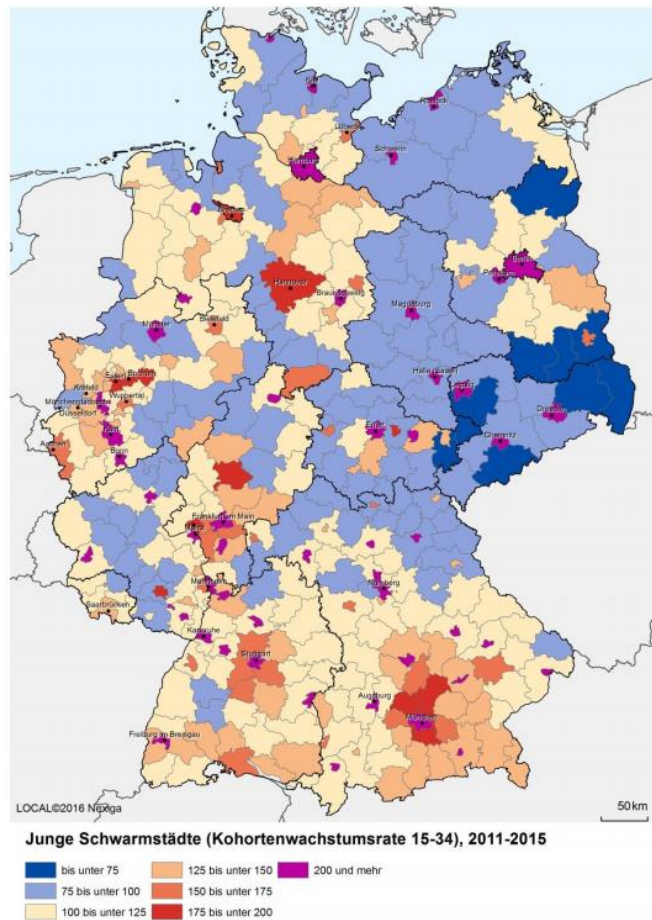


Abbildung 2: Kohortenwachstumsrate, Schwarmstädte Deutschland 2011-2015 [7]

Die Globalisierung und der demografische Wandel haben einen Einfluss auf die Nutzung von Gebäuden. Die Gebäudestrukturen und die Gebäudetechnik müssen dieser Entwicklung entsprechen. Es lässt sich die These ableiten, dass der demografische Wandel neue Nutzungsprofile hervorbringt, die in die Bestandsimmobilien implementiert werden müssen. Dass soll unter Berücksichtigung neuer Techniken und energetischer Aspekte geschehen. Die Globalisierung und die neuen Formen des Arbeitens erfordern angepasste Wohnsituationen.

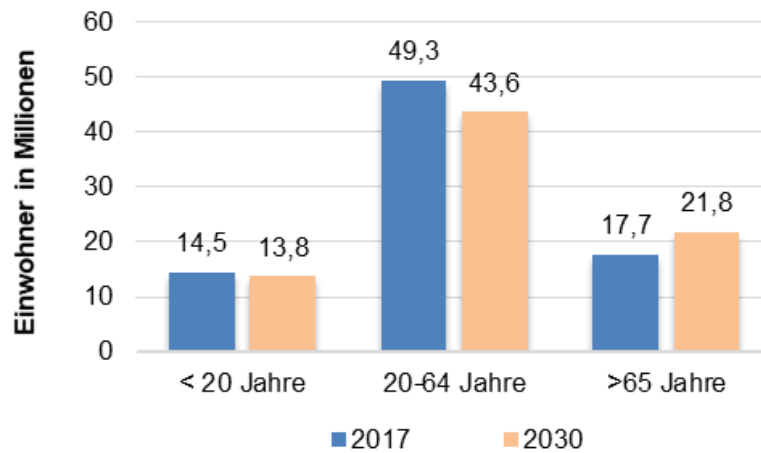


Abbildung 3: Bevölkerung in Deutschland nach Altersgruppen (Statistisches Bundesamt)

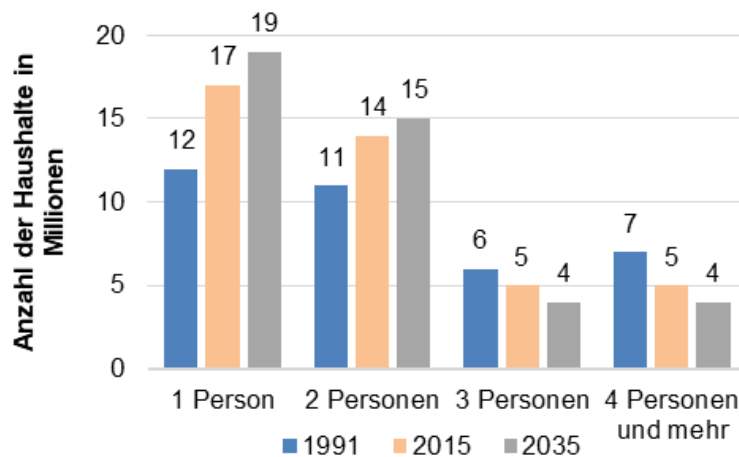


Abbildung 4: Privathaushalte nach Haushaltsgröße (Statistisches Bundesamt)

2.4 Struktur des Wohngebäudebestands (IRB)

Abbildung 5 zeigt die Verteilung der relativen Häufigkeit von Energieverbrauchskennwerten im Wohngebäudebestand in Deutschland. Etwa 8 % der Mehrfamilienhäuser und 10 % der Ein- und Zweifamilienhäuser entsprechen den EnEV Anforderungen. Bei den restlichen (92 % bzw. 90 %) besteht ein Sanierungspotential. Die Klimaziele sind ohne eine intensive Instandsetzung und Modernisierung des Bestands nicht erreichbar. Daher gilt es, Leitfäden und Handlungsempfehlungen für Bestandsbauten und –anlagen zu erarbeiten, insbesondere modulare Instandsetzungsverfahren.

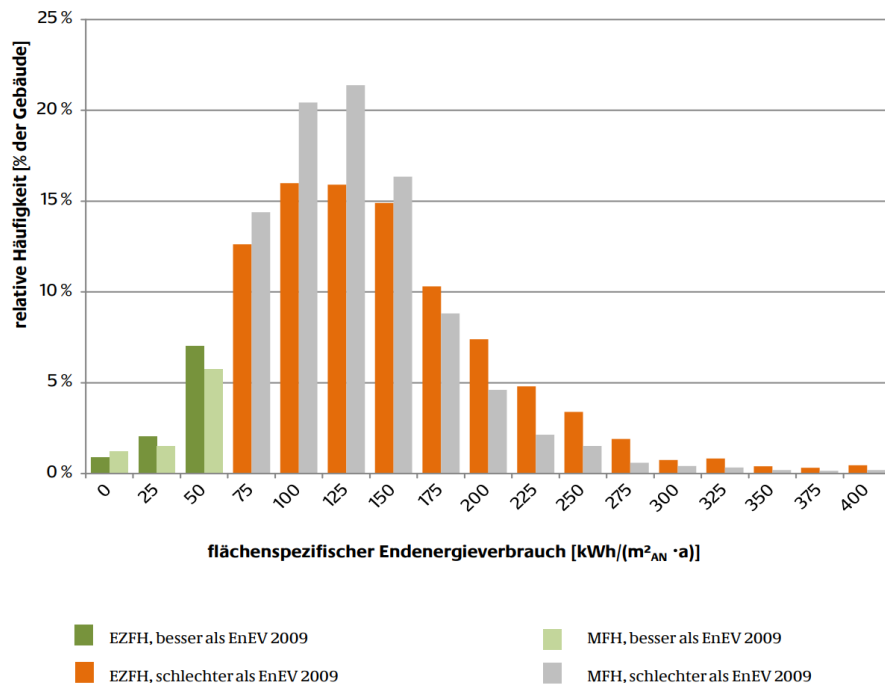


Abbildung 5: Verteilung (relative Häufigkeit) von Energieverbrauchskennwerten im Wohngebäudebestand in Deutschland [8]

Der Einsatz von Umweltwärme steigt vorwiegend durch den Neubau, da diese im Bestand mit veralteten Wärmeverteilsystemen und ungedämmten Fassaden nur ineffizient betrieben werden kann. Abbildung 6 zeigt die Entwicklung des Anteils von Wärmepumpen im Neubau in den Jahren 2000 bis 2019. Seit dem Jahr 2005 ist ein enormer Anstieg festzustellen.

Das GEG schreibt in § 48 vor, dass wer über 10 Prozent der gesamten Fläche einer Außenbauteilgruppe eines Bestandsgebäudes – Außenwand, Fenster, Türen, Dach, Decken – energetisch verändert, den Wärmedurchgang der betroffenen Außenbauteilfläche gemäß den Anforderungen des GEG begrenzen muss. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) darf die vorgeschriebenen Höchstwerte dabei nicht übersteigen. [5]

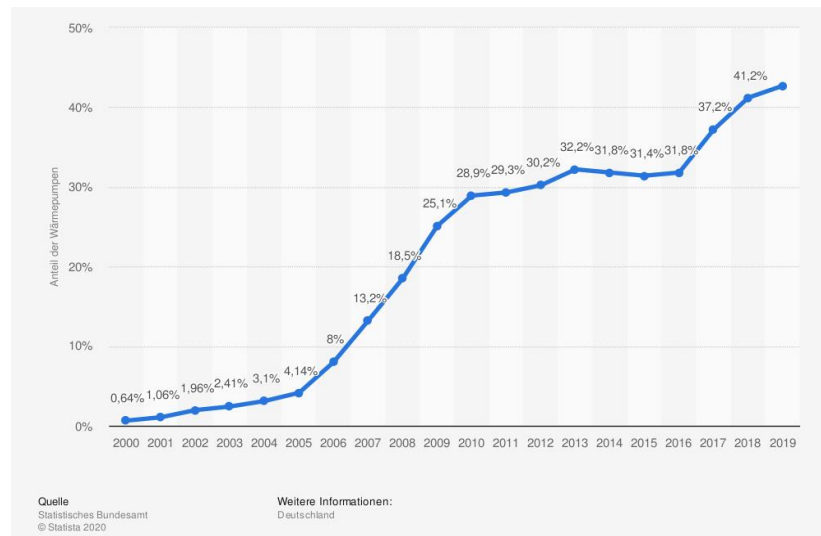


Abbildung 6: Anteil der Wärmepumpen im Neubau in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2019 [9]

Der Marktanteil von Wärmepumpen bei allen Sanierungen im Bestand beträgt nur 6 %. [10] Ursache dafür sind eben die im Bestand vorhandenen „alten“ Heizkörper, da die zu hohen benötigten Vorlauftemperaturen hohe Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe bewirken.

Daraus ergibt sich das Ziel der Implementierung von Umweltwärme im Bestand durch Integration von Systemen, die Umweltwärme effizient nutzen können (Einsatz Flächenheizungen, Bauteilaktivierung, Dämmung)

Das GEG schreibt Eigentümer auch Nachrüstungen für den Bestand vor. Im § 72 wird festgelegt, dass Öl- und Gasheizkessel (flüssiger oder gasförmiger Brennstoff), die vor 1991 eingebaut oder aufgestellt wurden, nicht mehr betreiben werden dürfen. Später installierte Heizkessel dieser Art dürfen nach 30 Jahren nicht mehr betreiben. Ab 2026 dürfen Kessel, die mit Heizöl oder festem fossilen Brennstoff, beispielsweise Kohle betrieben werden, nur neu einbauen oder installieren werden, wenn eine der Sonderbedingungen nach GEG § 72, Absatz (4) zutrifft. Unter besonderen Umständen entfällt diese Regelung, wenn der Aufwand zu einer unbilligen Härte führen würde. [5]

Bei Sanierung, Anbau oder Ausbau greifen die Anforderungen des GEG sowie bei der Renovierung öffentlicher Gebäude, um eine energetische Verschlechterung zu verhindern und der Einsatz von Wärmepumpen zu fördern, was zu einem weiteren Anstieg des Einsatzes von Wärmepumpen im Wohngebäude führen wird.

2.5 Performance Gap (IRB + IREES Input)

Bei vielen Sanierungen fallen die energetischen Einsparungen niedriger aus, als im Vorfeld der Sanierung prognostiziert. Diesen Unterschied zwischen dem vorher berechneten Energiebedarf und dem anschließend gemessenen Energieverbrauch bezeichnet man als Performance Gap. [11]

Die verbreitetste Definition des Performance Gaps ist die über den Energiebedarf und -verbrauch. Jedoch kann sich diese Lücke auch auf andere Bewertungsgrößen stützen, wie beispielsweise projektspezifische Vorgaben, Benchmark-Zahlen oder extern gesetzte Ziele, bei denen ebenfalls eine Lücke zwischen den geplanten und gemessenen Kennwerten aufgetreten ist. Weiterhin können bei dieser Abweichung auch verschiedene Betrachtungslevel untersucht werden, z. B. eine Wohnung, ein Einzelgebäude oder ein Gebäudepark. [12]

Die Untersuchungen der Ursachen für Performance Gaps beziehen sich meist auf die Lücke zwischen dem berechneten Energiebedarf und dem gemessenen Energieverbrauch. Die Gründe für diesen Gap sind vielseitig und individuell verschieden. Eine häufige Ursache sind Abweichungen zwischen angenommenen Normwerten und tatsächlich vorkommenden Gegebenheiten. [13] So definieren Normen häufig eine Innenraumtemperatur von 20 °C [14], wohingegen der Innenraum in der Realität häufig auf 23 °C geheizt wird. [13]

Auch der Luftaustausch durch Lüften ist oft höher als in den Normen angegeben. Dadurch steigt der tatsächliche Energieverbrauch und entspricht nicht dem mit Hilfe von normierten Werten berechneten Energiebedarf. Gründe dafür können ein falsches Nutzerverhalten oder falsche Einstellungen an der Anlagentechnik sein. [13]

Wie stark sich dieser Performance Gap ausbildet, ist von Fall zu Fall verschieden und hängt von unterschiedlichen Ursachen ab. Daher wird die Höhe des Performance Gaps auch in verschiedenen Quellen unterschiedlich hoch angegeben. So gibt es Angaben zu der Höhe des Gaps von etwa 15–30 %, 20–30 % [12], etwa 30 %, 42 % oder 35-71 %. [13]

Fest steht jedoch, dass das durch Sanierung geschaffene Einsparpotenzial häufig nicht vollständig ausgenutzt wird. Eine Möglichkeit zur Schließung der Lücke ist beispielsweise die Einbindung eines Energieexperten, der den gesamten Planungsprozess begleitet und alle Akteure (Planer, Handwerker, Bewohner usw.) vor, während und nach der Sanierung berät. [13]

Das GEG macht unter bestimmten Voraussetzungen eine Energieberatung verpflichtend. Laut §48 müssen die Eigentümer eines Wohngebäudes, mit bis zu zwei Wohnungen, bei

Änderungen am Gebäude gemäß Satz 1 vor der Beauftragung der Planungsleistungen, ein informatorisches Beratungsgespräch mit einem Energieberater führen. [5]

3 Das Untersuchungsobjekt (BPTM)

Das Bestandsquartier mit seinen Wohnungen von Anfang der 1900er Jahre stellt mit den dicken Außenwänden ($d_{\min} = 38 \text{ cm}$) ein hervorragendes Potential für eine nachträgliche Wandtemperierung dar.

3.1 Postbaugenossenschaft München und Oberbayern eG

Laut Genossenschaftsgesetz (GenG) ist eine Genossenschaft eine Gesellschaft „von nicht geschlossener Mitgliederzahl, deren Zweck darauf gerichtet ist, den Erwerb oder die Wirtschaft ihrer Mitglieder oder deren soziale oder kulturelle Belange durch gemeinschaftlichen Geschäftsbetrieb zu fördern“ (§1 Abs. 1 GenG). [15] Die Grundprinzipien sind Selbsthilfe, -verwaltung und -verantwortung. Sie agieren daher nicht gewinnorientiert und fokussieren sich auf die Interessen der Mitglieder. Wohnungsbaugenossenschaften stellen bezahlbaren Wohnraum für ihre Mieter, zur Verfügung, die gleichzeitig auch Mitglieder bzw. Gesellschafter sind. Derzeit werden in Deutschland rund 2,2 Mio. Wohnungen durch 1840 Wohnungsbaugenossenschaften zur Verfügung gestellt. [16] Die Entwicklung von nutzerverträglichen Modernisierungsverfahren sind für diese besonders relevant, um weiterhin preisgünstigen Wohnraum anbieten zu können. Die Postbaugenossenschaft München und Oberbayern ist Mitglied der Isarwatt eG, welche Dienstleistungen in den Bereich Energie und Mobilität für die Mitglieder übernimmt. Ein Aufgabebereich ist Verbrauchserfassung und Abrechnung der jeweiligen Energiearten. [17]

3.2 Renatablock

Die Referenzwohnung Nr. 0239 befindet sich im dritten Obergeschoss der Renatastr. 17, 80634 München und gehört zum sogenannten Renatablock, welcher insgesamt 214 Wohneinheiten umfasst. Auf dem Gelände befindet sich außerdem eine Kirche. Es handelt sich dabei um eine Zweizimmerwohnung mit separater Küche und Badezimmer. Die Gebäude des Renatablocks wurden zwischen 1913 und 1924 errichtet.¹ Die Lage der Referenzwohnung wird in Abbildung 7 und deren Grundriss in Abbildung 10 dargestellt. Sie befindet sich im zentralen Stadtbezirk Neuhausen-Nymphenburg, ist rund drei Kilometer vom Münchener Hauptbahnhof entfernt und ist eine der rund 2.000 Wohnungen der Baugenossenschaft in München und seiner Umgebung. Jede Wohneinheit verfügt derzeit über eine eigene Gastherme für Heizung und Warmwasserbereitung. Die Verträge über die Gaslieferung werden von den Bewohnern direkt mit den Stadtwerken geschlossen. Die einzige größere Modernisierungsmaßnahme ist die Erneuerung der Fenster 2010.

¹ In der Zeitspanne von 1900 bis 1950 wurden Gebäude nach bestimmten Regeln errichtet. Baukonstruktionen, der so genannten Altbauten, verfügen über zeittypische Konstruktionen und Baustoffe, welche mit der untersuchten Wohnung in Renatablock übereinstimmen.

Die Außenwände sind 46 cm stark und besitzen keine zusätzliche Dämmung. Es ist im Rahmen des Projektes nicht geplant eine anzubringen.

Das ausgewählte Wohnquartier der Baugenossenschaft des Post- und Telegrafenspersonals, befindet sich in der bayerischen Landeshauptstadt München im zentralen Stadtbezirk Neuhausen-Nymphenburg (PLZ: 80634), der mit rund 96.000 Bewohnern die zweitgrößte Einwohnerzahl nach Ramersdorf-Perlach aufweist. Der heutige Renatablock, rund 500 m Luftlinie vom Rotkreuzplatz entfernt, wurde fünf Jahre nach dem Zweiten Weltkrieg fertiggestellt. Die ersten Gebäudeensembles hingegen entstanden im Zeitraum 1910 bis 1914 und beinhalteten bereits 103 der insgesamt 150 Wohneinheiten. Folgende Abbildungen (Abbildungen 7 - 10) zeigen verschiedene Ansichten sowie die Grundrisse des Renatablocks und der Referenzwohnung.

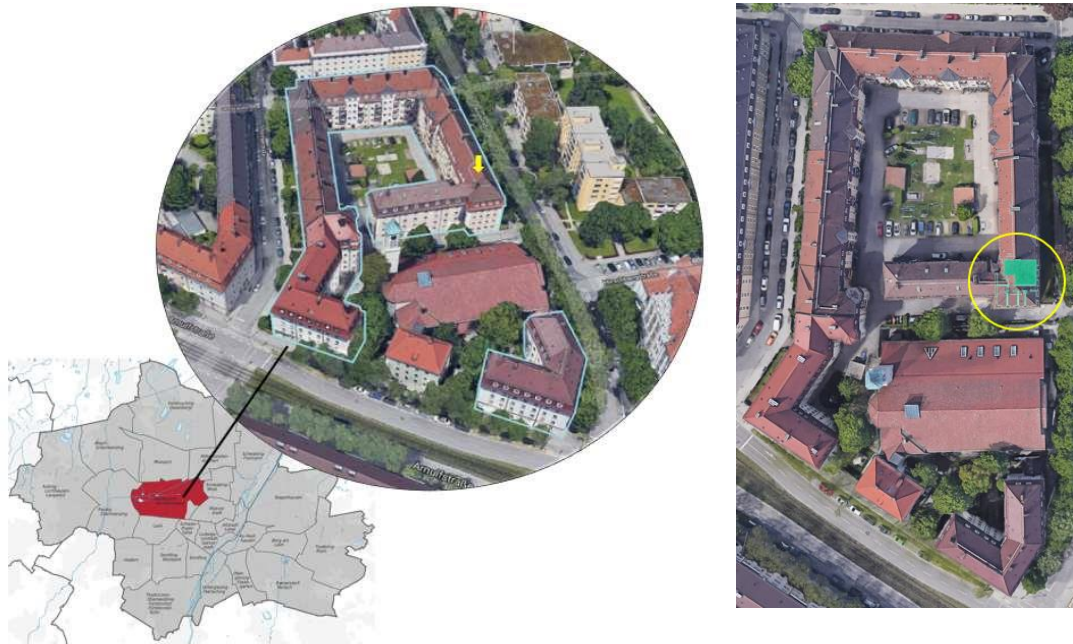


Abbildung 7: Renatablock in München und Positionierung der Referenzwohnung [18]



Abbildung 8: Ansichten Renatablock, links [18]



Abbildung 9: Ansicht Renatablock und Positionierung der Musterwohnung / Schnitt der Musterwohnung im 3. OG links

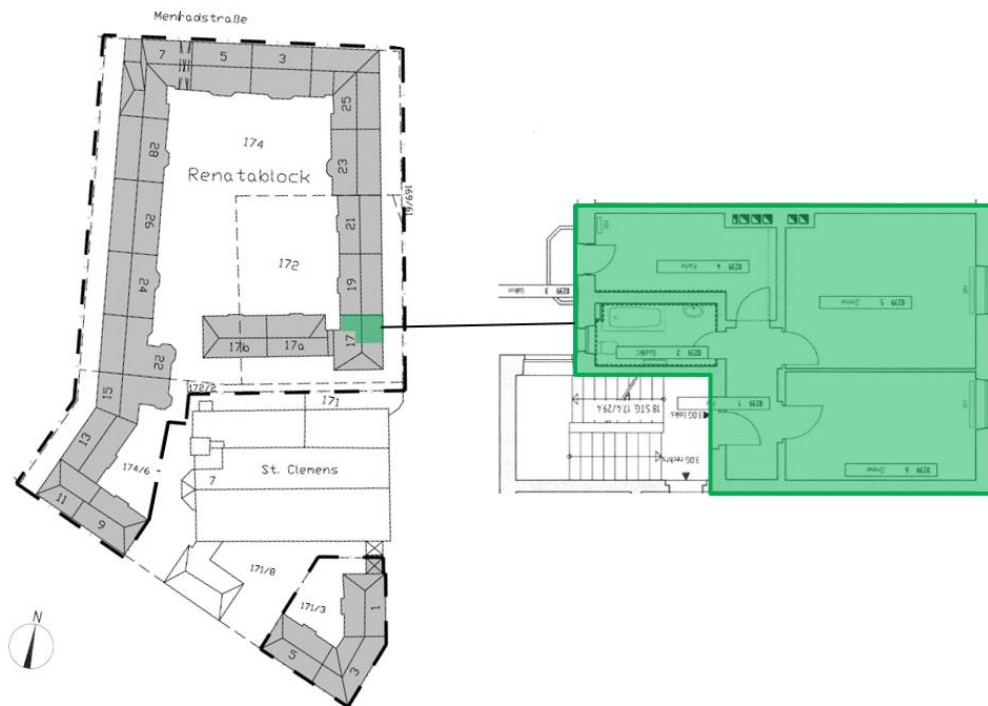


Abbildung 10: Grundriss Renatablocks und der Musterwohnung im 3. OG links

4 Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden die für das Forschungsprojekt relevanten theoretischen Grundlagen behandelt. Dabei wird auch auf die Themen Staub und Lärm eingegangen, da dies häufig kritische Punkte bei Sanierungen im bewohnten Zustand sind, welche die Nutzerakzeptanz beeinflussen.

4.1 Energetische Sanierung im Quartier (IRB)

Die Optimierung von Quartieren ist eine effiziente Möglichkeit, energetische Ziele zu erreichen und Synergien zu bilden. Quartiere sind einerseits groß genug, um Skaleneffekte zu erreichen und andererseits klein genug, um einen persönlichen Bezug zu den Bewohnern herzustellen. So können nicht nur energetische Ziele auf dieser Ebene umgesetzt werden, auch die Einbindung sozialer Aspekte ist möglich. [19]

Im Jahr 2011 wurde der Zuschuss „Energetische Stadtsanierung“ durch die KfW ins Leben gerufen. Dieser setzt sich mit den Handlungsfeldern der energetischen Modernisierung von Gebäuden, der energetischen Optimierung der Wärmeversorgung, der Gewinnung und Nutzung erneuerbarer Energien, der energieeffizienten Stromnutzung, der klimagerechten Mobilität sowie der Aktivierung, Öffentlichkeitsarbeit und Förderung klimabewussten Verhaltens auseinander. Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Beispielsprojekten, in denen die Umsetzung aller oder einiger dieser Handlungsfelder umgesetzt oder gestartet wurden. Der Zuschuss besteht dabei aus zwei Programmteilen. Im Programmteil A sollen integrierte Quartierskonzepte die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zur Energieeinsparung im Quartier aufzeigen. Der Programmteil B widmet sich den Aufgaben des Sanierungsmanagers, der die Planung des Prozesses der Umsetzung, eine effektive Maßnahmenrealisierung sowie die Vernetzung aller Akteure steuert. [20]

Die Kommunikation und die Vernetzung aller Akteure sind dabei wesentlich. Dazu zählen neben den Bewohnern auch die Energieerzeuger, die Wohnungsgesellschaften, Stadtplaner, Architekten sowie das politische Vertreten. Durch verschiedene Konzepte kann bereits frühzeitig eine Kommunikation aufgebaut werden, wodurch sich langfristig Konflikte zwischen einzelnen Akteuren vermeiden lassen. [20]

Die heterogene Struktur eines Quartiers kann bei einem ganzheitlichen Ansatz effizient genutzt werden. Einzelne Maßnahmen können an der Stelle angesetzt werden, an der sie für das Quartier die effizienteste Lösung entfalten. Quartiersbezogene Ansätze bieten dabei auch die Chance zur Erhaltung historisch wertvoller Architektur. So kann beispielsweise durch eine intelligente Vernetzung der Wärme- oder Stromversorgung historisch wertvoller mit energetisch optimierten Gebäuden eine effiziente Einsparung erzielt werden. [21]

4.2 Sanierung im bewohnten Zustand (IRB)

Energetische Sanierungen und sonstige Instandsetzungen bei Bestandsgebäuden sind oft unter dem Aspekt eines bewohnten Zustandes zu planen. Dies stellt eine Alternative zu einem Auszug aus den Wohnungen dar, ist jedoch mit Herausforderungen verbunden. Durch die Bauarbeiten entstehende Belastungen durch Lärm und Schmutz sowie Einschränkungen der Privatsphäre gilt es effektiv zu lösen. [22]

Daher gilt es, bei einer Sanierung im bewohnten Zustand einige Aspekte zu beachten. Um die Dauer der Arbeiten zu reduzieren, können Einzelteile bis hin zu gesamten Fassadenelementen im Werk vorgefertigt werden. Dadurch minimieren sich die Arbeiten auf der Baustelle. [23] Dies erfordert neben einem exakten Bestandsaufmaß vor der Sanierung [24] auch eine akribische Planung jedes einzelnen Arbeitsschrittes mit straffem Zeitmanagement und aufeinander eingespielten Handwerkerteams. Auch logistische Herausforderungen benötigen eine exakte Planung im Vorfeld. So kann beispielsweise das Vorhandensein nur eines (oder keines) Aufzuges einen Engpass für den Transport von Bauteilen und Baumaterialien darstellen. Ein solcher Punkt kann die Planung maßgeblich beeinflussen und beispielsweise eine gestaffelte oder vorzeitige Lieferung von Bauteilen zur Baustelle nach sich ziehen. [23]

Für das Gelingen ist eine intensive und frühe Zusammenarbeit aller Beteiligten wesentlich. Dies schließt die Planung, die ausführenden Gewerke und die Bewohner ein. [25] Entscheidend dabei ist die Kommunikation mit den Mietern. Schon eine kleine, stark beanspruchte Gruppe kann das Vorhaben komplett zum Erliegen bringen. Informationsveranstaltungen im Vorfeld der Sanierung, Offenheit in allen Projektphasen, eine gut erreichbare Ansprechperson für die Mieter sowie regelmäßige und zuverlässige Informationen über Planungsschritte tragen zu einem Gelingen der Sanierung wesentlich bei. [25]

4.3 Staub auf Baustellen (IRB)

Bei Sanierungen und Renovierungen in Bestandsbauten entsteht eine Menge Staub. Dieser kann ebenso wie Lärm zu Beeinträchtigungen und Belästigungen der Anwohner und Nachbarschaft führen, besonders während sommerlicher und trockener Wetterperioden. Bei den dabei entstehenden Stäuben handelt es sich in der Regel um Holzstaub oder mineralischen Mischstaub, der durch das Arbeiten mit Sand-, Kalksand- oder Ziegelsteinen sowie Gips, Zement oder Beton entsteht. [26]

Ist Staub einmal aufgewirbelt, kann er eine lange Zeit in der Luft verbleiben. So dauert es bei sehr kleinen Staubpartikeln fast sieben Stunden, bis diese um einen Meter sinken. [26] Von diesen sehr kleinen Staubteilchen geht die größte Gefahr für die Gesundheit aus, da diese bis in die Lungenbläschen gelangen können. [27]

Obwohl auf Baustellen Staub durch die Baufirmen verursacht wird, trägt laut dem Bundes-Immissionsschutzgesetz [28] der Bauherr als „Anlagenbetreiber“ die Verantwortung. Baustellen sind so einzurichten, dass vermeidbare Umwelteinwirkungen verhindert werden. Auf Baustellen lässt sich Staub jedoch nicht immer vermeiden. Daher gilt es, die Staubbelastung zu minimieren. [26] Durch den Einsatz von Bau-Entstaubern und Baumaschinen mit Absaugvorrichtungen können Staubbelastungen gemindert werden. [27] Der Einsatz von Staubschutztüren und -wänden bietet die Möglichkeit, einerseits die staubbelasteten Bereiche von den übrigen abzuschotten und andererseits durch das Erzeugen einer Unterdruckzone ein effizientes Absaugen des Staubes zu ermöglichen. [29] Sollten trotz geeigneter technischer Maßnahmen die Grenzwerte für Staub in der Luft überschritten werden, müssen für die Beschäftigten Schutzvorkehrungen, wie Atemmasken, eingesetzt werden. [30]

Die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft hat sich die Minimierung der Staubbelastung auf Baustellen als Ziel gesetzt. Sie unterstützen Betriebe bei der Anschaffung staubmindernder Maschinen und Geräte finanziell. Dadurch konnten bereits viele Betriebe ihre Arbeitsbedingungen verbessern. [27]

4.4 Lärm auf Baustellen (IRB)

Durch den Betrieb einer Baustelle entsteht Lärm. Dieser Baulärm hat für die Betroffenen einen hohen Belästigungsgrad. [31] Der auf Baustellen entstehende Lärm besitzt meist eine sehr tiefe Frequenz. Marktübliche Baustoffe haben gerade gegenüber solch tiefer Frequenzen meist eine schlechte Schalldämmung, wodurch der Baulärm ungehindert in die betroffenen Wohnbereiche eindringen und so zu starken Belästigungen führen kann. [32] Ob dieser als schädlich für die Anwohner einzustufen ist, regelt die „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm – Geräuschemissionen – AVV Baulärm“. [33]

Bereits während der Vorbereitungen der Bauarbeiten sollten mögliche Lärmemissionen berücksichtigt werden. Zur Minimierung dieser können verschiedene Maßnahmen, wie beispielsweise der Einsatz von lärmarmen Bauverfahren und -maschinen oder die Zusammenlegung von lärmintensiven Arbeiten mit anschließender langer Lärmpause, ergriffen werden. Eine frühzeitige Zusammenarbeit mit den betroffenen Anwohnern sowie das Informieren der Nachbarschaft und der Aufsichtsbehörden über unvermeidbare und besonders laute Arbeiten, kann das Konfliktpotenzial zwischen den verschiedenen Parteien zudem mindern. [33]

Eine Möglichkeit zur Reduzierung von Baulärm bietet der Einsatz von Schirmen, Einhausungen, Zelten und Kapseln aus Folien oder Membranen. Diese stellen jedoch einen

Kostenfaktor dar. Die Maßnahmen können dabei global oder lokal ausgeführt werden. Ein globaler Schutz, also ein Schutz vor allen auf der Baustelle auftretenden Emissionen, hat zwar einen hohen Wirkungsgrad, ist aber besonders bei wachsenden Baustellen praktisch nicht immer umsetzbar. Lokale Maßnahmen, beispielsweise das Aufstellen von versetzbaren Stellwänden, sind zwar flexibler einsetzbar, können aber auch eine geringere Wirksamkeit aufweisen. [31]

Baulärm stellt jedoch nicht nur ein Problem bezüglich der Belästigung der Anwohner dar, es kann auch eine Gefährdung der Gesundheit, für die auf der Baustelle Beschäftigten von ihm ausgehen. Zur Beurteilung einer möglichen Gefährdung durch Lärm sowie zur Festlegung der entsprechenden Schutzmaßnahmen dient die Verordnung „Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – TRLV Lärm“. Diese regelt den Ablauf der Gefährdungsbeurteilung, die Messung der auftretenden Lärm-Emissionen, verschiedene Grenzwerte sowie den Einsatz von Schutzmaßnahmen. [34]

4.5 Thermische Behaglichkeit (IRB)

Das Wohlbefinden des Menschen ist vom akustischen, visuellen, olfaktorischen und thermischen Umfeld geprägt. [35] Bei der Gestaltung von Gebäuden gewinnt die thermische Behaglichkeit stets mehr an Bedeutung. Wann ein Raum als behaglich einzustufen ist, ist stets subjektiv und vom individuellen Empfinden des einzelnen Menschen abhängig. [36]

Die thermische Behaglichkeit wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Wesentliche Einflussgrößen sind einerseits die Temperatur der Umschließungsflächen und der Strahlungsanteil sowie andererseits die Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte. Ebenso relevant sind die Bekleidung, der Aktivitätsgrad und die Aufenthaltsdauer des Menschen. Als unbehaglich werden oft Zegerscheinungen, warme oder kalte Fußböden sowie vertikale Luftunterschiede angesehen. [37]

Um eine thermische Behaglichkeit physikalisch beschreiben zu können, werden Bereiche definiert, die für die meisten Menschen als behaglich anzusehen sind. [37] Es kann von guten thermischen Verhältnissen in einem Raum ausgegangen werden, wenn nicht mehr als 10 % der Nutzer das Raumklima als unbehaglich empfinden. [36] Ein Raum wird nach Norm als behaglich eingestuft, wenn die Differenz zwischen den Wandoberflächen und der Raumlufttemperatur maximal 4 K, die Differenz zwischen Oberflächentemperaturen verschiedener Raumflächen maximal 5 K und die Differenz der Lufttemperaturen von Fuß- bis Kopfhöhe maximal 3 K beträgt [38]

Eine vereinfachte Variante zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit stellt die Bewertung mittels der operativen Temperatur, auch Empfindungstemperatur genannt, dar. Sie bildet näherungsweise einen Mittelwert aus der Lufttemperatur und den gemittelten

Oberflächentemperaturen des Raumes. [36] So kann im Winter eine Empfindungstemperatur im Wohnraum von 20 bis 22° C [38] und im Sommer eine Empfindungstemperatur von 23 bis 27° C als behaglich angesehen werden. [36]

Ein gegensätzliches Konzept zur vereinfachten Beurteilung, etwa mittels der Empfindungstemperatur, stellt die Individualisierung des Raumklimas dar. Dies kann beispielsweise durch die Einbindung spezifischer Applikationen in intelligente Gebäudeausrüstungen umgesetzt werden. Pilothaftige Forschungsvorhaben zeigen, dass dadurch nicht nur eine individuelle Behaglichkeit für jede Person, sondern auch ein intelligentes Energiekonzept umsetzbar ist. [39]

Ganzheitlich betrachtet spielt das Erreichen einer thermischen Behaglichkeit nicht nur für das Wohlempfinden des Menschen eine Rolle, sondern ist zudem für optimierte Energieeinsparungen und CO₂-Minderungspotentiale relevant. [36]

Die thermische Behaglichkeit steht für das Komfortempfinden eines Menschen für die klimatischen Verhältnisse. Nach Fanger² lässt sich die empfundene Behaglichkeit prognostizieren. Dazu müssen verschiedene Eingabe-, beziehungsweise Messgrößen bekannt sein (Raumlufthemperatur, mittlere Strahlungstemperatur der Raumschließungsflächen, relative Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, Bekleidungs- und Aktivitätsgrad). [40]

Der PMV-Index³, welcher auf dem Wärmegleichgewicht des menschlichen Körpers beruht, lässt sich über folgende Gleichungen ermitteln:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \{(M - W) - 3,05 \times 10^{-3}[5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,042(M - W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5}M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad \text{Gl. 1}$$

Mit

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl}\{3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_c \cdot h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad \text{Gl. 2}$$

Und

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{für } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{für } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad \text{Gl. 3}$$

Gl. 4

² Povl Ole Fanger war ein Professor und hat sich mit Gesundheitsaspekten im Innenraumbereich, mit thermischer Behaglichkeit und der Qualität von Raumluft beschäftigt.

³ PMV ist Predicted Mean Vote (= erwartete durchschnittliche Empfindung) und ist ein Wert, der den Grad der Behaglichkeit oder Unbehaglichkeit beschreibt.

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{für } I_{cl} \leq 0,078\text{m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{für } I_{cl} > 0,078\text{m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases}$$

Dabei ist

M der Energieumsatz, in Watt durch Quadratmeter ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);

W die wirksame mechanische Leistung, in Watt durch Quadratmeter ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);

I_{cl} die Bekleidungsisolations, in Quadratmeter Kelvin durch Quadratmeter ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$);

f_{cl} der Bekleidungsflächenfaktor;

t_a die Lufttemperatur, in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$);

\bar{t}_r die mittlere Strahlungstemperatur, in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$);

v_{ar} die relative Luftgeschwindigkeit, in Meter durch Sekunde (m/s);

p_a der Wasserdampfpartialdruck, in Pascal (Pa);

h_c der konvektive Wärmeübergangskoeffizient, in Watt durch Quadratmeter Kelvin ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$);

t_{cl} die Oberflächentemperatur der Bekleidung, in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

1 Metabolische Einheit = 1 met = 58,2 W/m²; 1 Kleidungseinheit = 1 clo = 0,155 m² · °C/W.

Der PMV-Wert prognostiziert die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Personen. Tabelle 2 gilt als Klimabeurteilungsskala für den PMV-Wert.

Tabelle 2: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala [40]

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

Aus dem PMV-Index lässt sich der PPD-Index (predicted percentage of dissatisfied), also der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen, mittels der Gleichung 5 bestimmen.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot \text{PMV}^4 - 0,2179 \cdot \text{PMV}^2) \quad \text{Gl. 5}$$

Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) liefert Angaben zur thermischen Unbehaglichkeit oder Unzufriedenheit, indem der Prozentsatz an Menschen vorausgesagt

wird, die ein bestimmtes Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden. Abbildung 11 zeigt, dass selbst bei optimalen Verhältnissen immer ein gewisser Grad an unzufriedenen Personen erhalten bleibt.

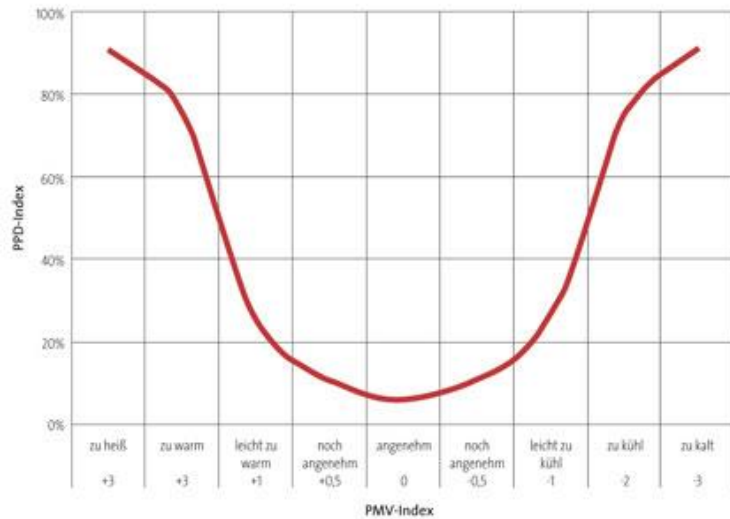


Abbildung 11: PMV- und PPD-Werte im Verhältnis [41]

Im nächsten Kapitel werden, die zur thermischen Unbehaglichkeit führenden Faktoren beschrieben und wie die Methode der Außenwandtemperierung diese minimieren soll.

4.5.1 Operative Raumtemperatur

Um einen Raum zu beheizen, kann man entweder das Medium Luft direkt aufheizen oder man probiert für den Menschen über den Strahlungsaustausch mit wärmeren Oberflächen ein behagliches Klima herzustellen. Je höher der Strahlungswärmeanteil im Raum ist, umso geringer kann die Lufttemperatur sein, um Wohlbefinden zu erzeugen, was die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste reduziert. Je 1 °C Raumlufttemperaturabsenkung ist eine pauschalisierte Energieersparung von 6% angegeben. [42] Die geringsten Oberflächentemperaturen weisen die Außenluft-berührenden Bauteile auf (Außenwand, Fenster). Die Temperierung der Außenwand hat dadurch einen merkbaren Einfluss auf die Behaglichkeit. Zum einen wird der Kaltluftabfall, der an großen kalten Flächen normalerweise entsteht und das damit einhergehende Zugluftrisiko minimiert. Zum anderen gibt es keine große Strahlungsasymmetrie, da sich die Temperaturen der raumumschließenden Oberflächen gleichen. Bei 6 K Temperaturdifferenz zwischen zwei Raumbegrenzenden Oberflächen spürt der Mensch eine Asymmetrie. Ab 10 K wird es unbehaglich. [42]

Die operative Raumtemperatur oder auch kurz Raumtemperatur bezeichnet die wahrgenommene Temperatur, die sich aus der Lufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen zusammensetzt. Die operative Raumtemperatur berechnet sich vereinfacht nach Gleichung 6 [43]:

$$\theta_o = a \cdot \theta_i + (1 - a) \cdot \theta_r \quad \text{Gl. 6}$$

wobei

θ_o = Operative Temperatur in °C

θ_r = Mittlere Strahlungstemperatur in °C

θ_i = Lufttemperatur in °C

$a = \frac{\alpha_K}{\alpha_K + \alpha_S}$ = Wichtungsfaktor in [-]

mit α_K = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in W/(m²·K)

mit α_S = langwelliger Strahlungswärmeübergangskoeffizient in W/(m²·K)

$a = 0,5$ für Luftgeschwindigkeiten $v < 0,2$ m/s

$a = 0,6$ für Luftgeschwindigkeiten $v = 0,2 \dots 0,6$ m/s

$a = 0,7$ für Luftgeschwindigkeiten $v = 0,6 \dots 1,0$ m/s

Bei einer detaillierten Betrachtung variiert die Strahlungstemperatur je nach Aufenthaltsort einer Person innerhalb eines Raumes, da die Strahlungstemperaturen der verschiedenen Oberflächen mit den verschiedenen lokalen Einstrahlzahlen (geometrisches Sichtverhältnis zwischen Bauteil und Person) gewichtet werden und somit eine mittlere Strahlungstemperatur entsteht. [42]

Bezüglich der thermischen Unbehaglichkeit durch eine asymmetrische Strahlungstemperatur, zeigt der Mensch bei einer warmen Wand die größte Toleranz. Am empfindlichsten reagiert der Mensch bei einer warmen Decke und bei einer kühlen vertikalen Fläche (Fenster oder Außenwand), was in Abbildung 12 zu sehen ist. [44] Durch die Temperierung der Außenwand überwiegt der Strahlungsanteil zur Deckung des menschlichen Wärmebedarfs. Große Luftbewegungen, die bei Konvektor Heizkörpern entstehen, bleiben aus. Das reduziert die Staubbewegung bzw -bildung im Raum und kommt dadurch Allergikern zugute.

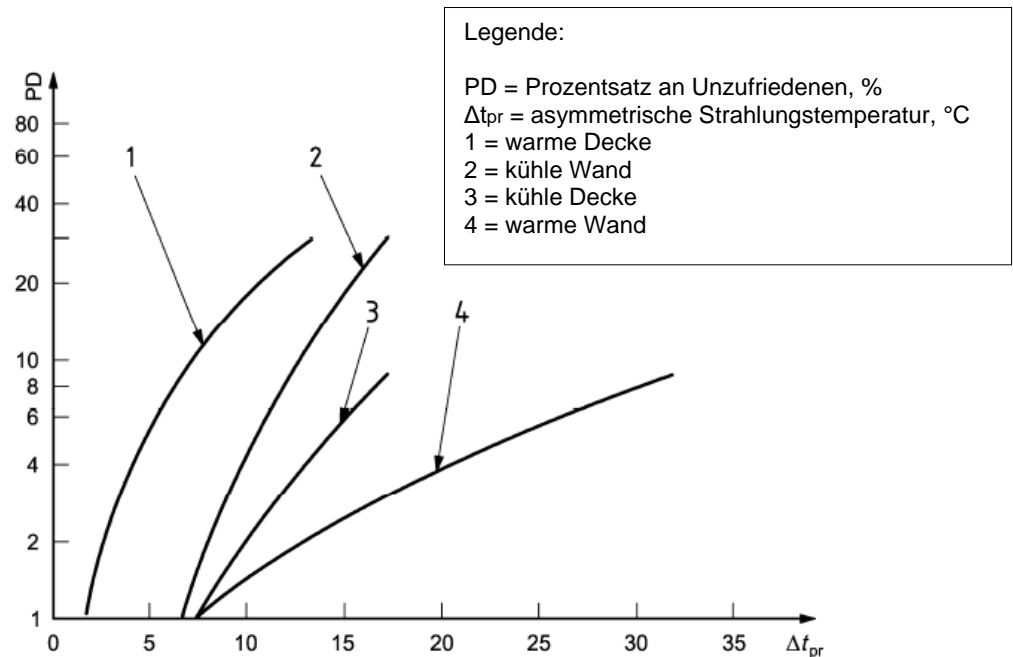


Abbildung 12: Prozentsatz an Unzufriedenen bei asymmetrischer Strahlungstemperatur [44]

Das Ziel bei der temperierten Außenwand ist eine Lufttemperatur von 18 °C und eine mittlere Oberflächentemperatur größer als 18 °C.

Erfahrungswerte für die Empfindungstemperatur in unterschiedlich genutzten Räumen [44]:

- Wohnraum: 20 – 22 °C
- Schlafräum: 16 – 18 °C
- Bad: 24 – 26 °C

Ein Raum wird als behaglich empfunden, wenn [45]:

- Differenzen zwischen Wandoberflächentemperaturen und Raumlufttemperatur weniger als 4 K
- Lufttemperaturen von Fuß- bis Kopfhöhe weniger als 3 K betragen
- Oberflächentemperaturen verschiedener Raumflächen (Strahlungsasymmetrie) weniger als 5 K

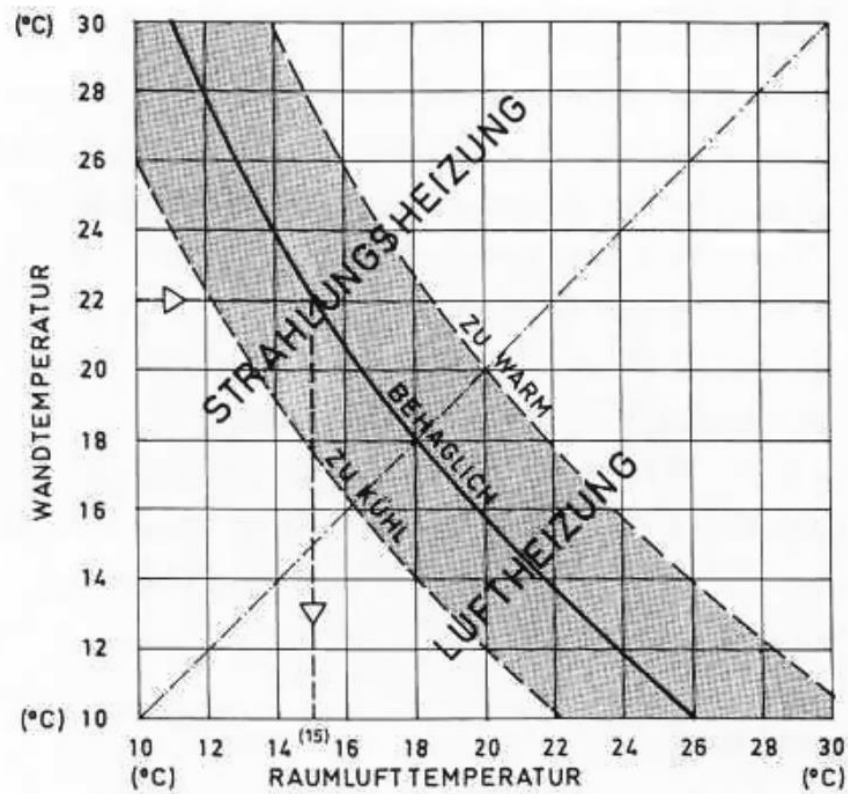


Abbildung 13: Behaglichkeitsfeld Strahlungs-/Raumlufttemperatur [46]

Bzgl. der Lufttemperatur ist zusätzlich auch der vertikale Temperaturgradient im Raum für die thermische Behaglichkeit von Bedeutung. Nach DIN 1946-2:1994-01 darf dieser höchstens 2 Kelvin pro Meter Raumhöhe betragen. Dabei sollte eine Lufttemperatur von 21°C in 0,1m über den Fußboden nicht unterschritten werden. Der Temperaturunterschied zwischen den Kopf und den Füßen maximal 3 Kelvin betragen darf. [47]

4.5.2 Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit ist relevant, da dadurch der Wärmeübergangskoeffizient am menschlichen Körper und damit auch die Wärmeübertragung beeinflusst werden. Die Luftbewegung hat dadurch einen erheblichen Einfluss auf die Behaglichkeit. Wie Luftgeschwindigkeit bewertet wird, hängt von der Prägung des Individuums durch Klimazone und Umgebung ab. Personen sind in geschlossenen Räumen empfindlicher gegenüber Luftbewegung. Am meisten wird das Wohlbefinden gestört, wenn die bewegte Luft eine geringere Temperatur als die Raumluft hat und vorwiegend aus bestimmter Richtung ein Körperteil trifft. Man spricht in diesem Fall von Zugluft. [48]

4.6 Thermische Bauteilaktivierung (IRB)

Bei der thermischen Bauteilaktivierung wird Gebäudemasse zur Temperaturregulierung genutzt. Mehrheitlich wird das Verfahren zur Beheizung oder Kühlung eingesetzt. Wird die thermische Bauteilaktivierung zur Beheizung genutzt, wird durch in Bauteile eingebrachte Heizungsrohre Wärme direkt an das Bauteil abgegeben (s. Abbildung 14).

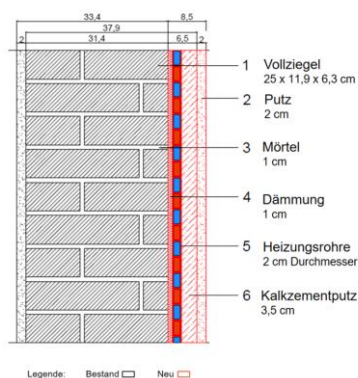


Abbildung 14: Bauteil der Außenwand: a) Schnitt mit Wandaktivierung und b) Wärmestrahlung vom Bauteil in den Raum

Die bekannteste Umsetzungsvariante dieses Prinzips ist die Fußbodenheizung, jedoch können auch Außenwände, Innenwände oder Decken thermisch aktiviert werden. [49] Im Gegensatz zur Beheizung über Radiatoren, bei der zunächst die Luft erwärmt wird, wird bei einer thermischen Bauteilaktivierung das Bauteil beheizt. Das Bauteil wiederum gibt die Wärme in Form von langwelliger Strahlung ab. Diese Strahlung ähnelt dem Sonnenlicht und wird vom Menschen als angenehm empfunden. Da der Mensch ebenso Wärme an seine Umgebung abgibt, ist der Strahlungsaustausch zwischen Menschen und einem erwärmten Bauteil geringer, wodurch die empfundene Raumtemperatur höher ist als die tatsächliche. [49] Dies führt dazu, dass eine um 2 bis 3 °C geringere Raumlufttemperatur bereits genügt, um Wohlbefinden zu erzeugen. [50]

Zudem sind durch die großen Übertragungsflächen geringere Systemtemperaturen nötig. Dies ermöglicht eine Nutzung von Niedertemperaturquellen und eignet sich gut für eine Kombination mit erneuerbaren Energien. [51] Die Bauteiltemperierung findet in historischen Bauten häufig zur Trocknung von Bauteilen Anwendung. So kann die Gefahr von Bauteilschäden durch mikrobiellen Bewuchs, Salzkristallationswechsel oder Frost minimiert bzw. vorgebeugt werden. [52] Ein Nachteil von Bauteilaktivierungen ist die lange Reaktionszeit, die Raumtemperatur kann also nicht schnell an veränderte Anforderungen angepasst werden. [49]

Bei Neubauten wird es meist als Betonkernaktivierung umgesetzt, da sich Beton durch seine Eigenschaften sehr gut für dieses Verfahren eignet. [52] Die Ausführung einer thermischen Bauteilaktivierung mit Ziegelsteinen ist nicht sehr verbreitet, auch wenn gebaute Beispiele vorhanden sind. Eine Aktivierung einer Ziegelwand ist, unter der Beachtung der physikalischen Eigenschaften des Ziegels, effektiv umsetzbar. [49] Da gerade im Bestand die thermisch aktivierbare Gebäudemasse häufig aus Ziegeln besteht und diese in älteren Gebäuden große Tiefen aufweisen, sind diese oft gut geeignet. [53]

4.7 Materialien für die Bauteilaktivierung

Bei der thermische Außenwandaktivierung wird mit dem Schlitzen der Ziegelwand begonnen. In diesen Schlitzen werden daraufhin die Heizungsrohre verlegt. Durch die in den Bauteilen angebrachten Heizungsrohre, wird das Betriebswasser durchgeführt und somit wird die Wärme direkt an das Bauteil abgegeben. Dadurch werden die Außenwände temperiert und dem Raum wird durch die Wände, Wärme zugeführt. Damit der Wärmestrom in die Richtung des Raumes und nicht nach außen fließen kann, ist die Verwendung eines Dämmstoffes hinter den Heizungsrohren an der Außenwand notwendig. Die Hohlräume müssen dann mit einem Füllmaterial überdeckt werden.

Die Auswahl, der für die Wandaktivierung passenden Materialien sowie den Vergleich nach ihren physikalischen und thermischen Eigenschaften, wird in den nächsten Kapiteln erläutert.

4.7.1 Heizungsrohre

Während Heizungsbauer bis in die 1980er Jahre hinein überwiegend auf Kupferrohre setzten, sind seitdem auch Fußbodenheizungsrohre aus Kunststoff im Einsatz. [54] In der Tabelle 3 sind die Eigenschaften und Kennwerte von den überwiegend verwendeten Metall- und Kunststoffrohren der Fußbodenheizung gelistet.

Generell haben die Metalle im Vergleich zu den Kunststoffen bessere Wärmeeigenschaften sowie eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Das ist speziell für die Wandaktivierung sehr gut und vor allem leistungswert. Die Metallrohre sind aufgrund ihrer Kristallstruktur nicht elastisch, und müssen dadurch durch mehrere Verbindungen in der Wand angelegt werden, welche wiederum mit der Zeit zur Undichtigkeit führen können. Das gesamte Verfahren mit dem Biegen und der weiteren Verbindung der Metallrohre ist außerdem sehr aufwendig. Geht es um die Kosten der Rohre, ist Kupfer in der Regel teurer als Kunststoff.

Mit seinem 5-schichtigen System⁴ vereint das Alu-Verbundrohr die positiven Eigenschaften von Kunststoff und Metall. Dank seiner guten Korrosionsbeständigkeit sind diese Rohre komplett dampf- und sauerstoffdicht. Zudem halten sie auch hohen Drücken und Temperaturen stand.

Tabelle 3: Rohrmaterialien für die Außenwandaktivierung

Rohrmaterial		Kupfer [55]	Alu-Verbund [56]	PE-RT [57]	PE-XC [58]	PE-XA [59]
Außendurchmesser,	mm	20	20	20	20	20
Wandstärke,	mm	2	2	2	2	2
Betriebstemperatur,	°C	≤ 100	≤ 95	≤ 90	≤ 70	≤ 90
Betriebsdruck	bar	≤ 54	≤ 12	≤ 6	≤ 6	≤ 6
Wärmeleitfähigkeit	W/(m*K)	364	0,43	0,4	0,35	0,35
Ausdehnungskoeffizient	mm/(m*K)	0,017	0,023	0,014	0,015	0,015
Maßen	mm	16x2	16x2	16x2	16x2	16x2
Biegeradius	mm	-	5*d _r	5*d _r	5*d _r	5*d _r
Rohrlänge	m	600	500	600	600	600
Kosten	€/1 Meter	1,40	0,84	0,59	0,82	0,76

Die anderen Materialien sind Kunststoffrohre aus Polyethylen (Kurzbezeichnung: PE). Die PE-Rohre bestehen auch aus 5-Schichten qualitativ hochwertiger Werkstoffe⁵. Das Kunststoff PE-RT steht für Raised Temperature Resistance und ist speziell zur Verwendung bei Heizkörperanbindungen entwickelt worden. Diese Rohre sind sauerstoffdicht und haben eine hohe Temperaturbeständigkeit. Die beiden Kunststoffe PE-XC und PE-XA sind hochvernetzte Polyethylene. Dank der Vernetzung wird das Polyethylen dauerelastisch und sehr widerstandsfähig sein, was dazu führt, dass auch die Lebensdauer erhöht wird. Mit einem Durchmesser der Rohre von 20 mm soll eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahren erwartet werden. [60] Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 1,5 sind Abwasserdruckrohre aus PE mit einem Betriebsdruck von 12,5 bar (SDR 11) bei 20 °C mindestens 100 Jahre belastbar. [61]

Der Unterschied von den beiden Polyethylenen (PE-XC und PE-XA) wird in der Vernetzungsart erkennbar. Das PE-XC ist ein physikalisch vernetzter Polyethylen. Diese Art der Vernetzung wird nachträglich (außer bei der Produktionskette) durch elektromagnetische Strahlung durchgeführt. Dadurch bleibt der Kristallisationsgrad unverändert und die Steifigkeit des vernetzten Kunststoffs bleibt erhalten. Das PE-XA ist ein peroxidisch vernetztes Polyethylen. Diese Art der Vernetzung wird beim Schmelzen in der Produktionsprozesskette durchgeführt. Dadurch wird die Kristallisation zurückgedrängt, was zu einer

⁴ Schichtaufbau eines Alu-Verbundrohres von innen nach außen: PE-X, Haftvermittler, Alu-Rohr, Haftvermittler, PE-RT.

⁵ Schichtaufbau eines PE-Rohres von innen nach außen: PE-X, Haftvermittler, Sauerstoffsperrschicht aus EVOH (Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer), Haftvermittler, PE-X.

geringeren Dichte des Kunststoffes und einer höheren Flexibilität führt. Die beiden hochvernetzten Polyethylene sind robust, lange haltbar, haben höhere Temperaturbeständigkeit, höhere Schlagzähigkeit, sowie Beständigkeit gegenüber einer Spannrissbildung. Im Vergleich zum PE-XC ist PE-XA weniger steif, wodurch eine leichtere Verlegung der Rohre ermöglicht wird. Dank seiner guten thermischen und physikalischen Eigenschaft sowie der unkomplizierten Verlegung der Rohre, passt das PE-XA optimal zur Außenwandtemperierung. Außerdem sind die PE-XA Rohre unter dem Aspekt der Ökobilanz für thermisch aktive Bauteile, sehr gut geeignet (EIP99 < 0,1⁶).

Bei der Außenwandtemperierung ist es von Bedarf, dass die Installation platzsparend geplant und durchgeführt werden soll. Auf dem Markt sind die Heizungsrohre von verschiedenen Durchmessern zu finden. Aus diesem Grund ist es gut zu wissen, wie minimal ein Durchmesser der Rohr- bzw. Schlauchleitung sein darf (s. Abbildung 15). Es hängt meistens von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Volumenstrom des Mediums ab (in unserem Fall: Wasser) und wird folgendermaßen berechnet [62]:

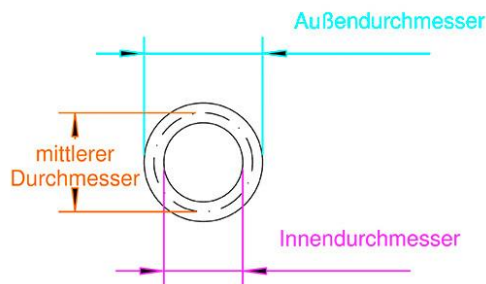


Abbildung 15: Rohrgeometrie [63]

$$d_{min} = \sqrt{\frac{\dot{V} \cdot 4}{v \cdot \pi}}$$

d_{min} = Minimaler Durchmesser (mm)

\dot{V} = Volumenstrom (cm/s)

v = Strömungsgeschwindigkeit (m/s)

Müssen die Rohre beim Leitungsverlauf in L- bzw. U-Bogen (s. Abbildung 16 a und b) verlegt werden, können aufgrund von Belastung durch den Innendruck, zusätzliche Spannungen und Kräfte auftreten. In diesem Fall ist es wichtig, die Biegeschenkelänge zu berechnen. Durch eingebaute Dehnungskomponenten können die auftretenden Spannungen und Kräfte auf die Lagerelemente (Bauwerke) verringert werden. Zusätzliche Sicherung durch die Position der Rohrleitung in dem Schlitz, ist ebenfalls empfehlenswert. Dafür könnten z.B. verschiedene Halterungssysteme oder Rohrführungsbögen eingesetzt werden.

⁶ EIP99 = Eco-indicator pp-Punkte

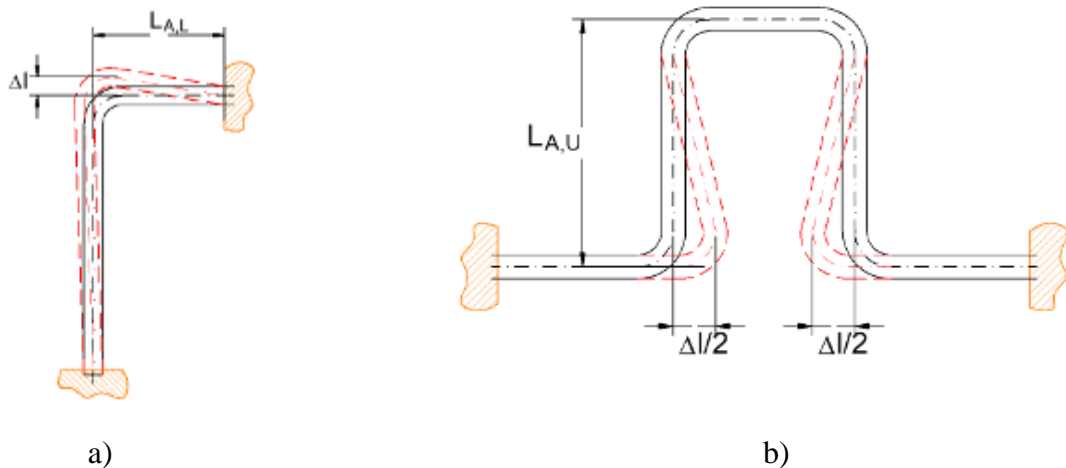


Abbildung 16: Biegeschenkel beim a) L-Bogen und b) U-Bogen

$$L_{A,L} = C_L * \sqrt{\Delta l * d_a}$$

$$L_{A,U} = \frac{C_U}{\sqrt{2}} * \sqrt{\Delta l * d_a}$$

$L_{A,L}$ = Biegeschenkellänge (mm)

$L_{A,U}$ = Ausladelänge (mm)

Δl = Wärmedehnung (mm)

d_a = Rohraußendurchmesser (mm)

C_L = Werkstoffkonstante (-)

4.7.2 Dämmstoffe

Im Rahmen einer Außenwandtemperierung, sollte die Dämmebene direkt hinter den Heizungsrohren im Inneren des Bauteils angeordnet werden. Damit kann der Wärmeenergiebedarf sowie die Treibgasemissionen deutlich reduziert werden. Zu den Klassikern der Innendämmung gehört das Anbringen von Dämmstoffplatten, z.B. in Form von Polystyrol-, Polyurethan- oder Kautschukschaum. In der Tabelle 4 sind diese Materialien mit ihren physikalischen und thermischen Eigenschaften, Kosten und anderen Parametern aufgelistet.

Durch die Polymerisation von Styrol wird Polystyrol hergestellt. Bei der Herstellung ist ein großer Einsatz an toxischen Stoffen notwendig, wie z.B. Benzol. Das Material ist erdölbasiert und hat eine hohe Steifigkeit, mittlere Festigkeit, geringe Schlagzähigkeit und neigt stark zur Spannungsrissbildung. Um die Eigenschaften zu verbessern, kann das Material entweder expandiert oder extrudiert werden. Ein expandiertes Polystyrol hat den Markennamen Styropor (Kurzbezeichnung: EPS). Bei dem Verfahren wird Polystyrol-Granulat mit Treibmittel (CO_2) und Wasserdampf behandelt. Die Körner blähen sich um das 20- bis 50-fache Volumen auf und nach dem zweiten Schäumen werden die entstehenden Styroporperlen miteinander verschweißt. Die entstandenen Hartschaumplatten

lassen sich dann in Blöcke schneiden. Bei einem extrudierten Polystyrol, was den Markennamen Styrodur (Kurzbezeichnung: XPS) hat, handelt es sich um ein Polystyrol, das durch eine Düse gepresst, dann unter der Zugabe von einem Treib- und Brandschutzmittel geschmolzen und dann wieder in eine Plattenform gepresst wurde. Der Vorgang ist energieintensiver als beim EPS, damit kostet das XPS doppelt so viel als das EPS, hat aber wiederum bessere Eigenschaften. Im Gegensatz zu einer rauen und ungleichmäßigen Struktur des EPSs, hat das XPS eine glatte geschlossene Zellstruktur. Das XPS ist außerdem im Gegenteil zum EPS robust, hat hohe Druckstabilität und ein besseres Feuchtverhalten.

Tabelle 4: Dämmstoffe für die Außenwandaktivierung

Dämmstoff	Styropor [64]	Styrodur [65]	PU [66]	Armaflex [67]
Material	Expandiertes Polystyrol (EPS)	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	Polyurethan-Hartschaum (PUR) Polyisocyanurat (PIR)	Elastomerschaum (synth. Kautschuk)
Anwendungstemperatur °C	-10 bis +80		-40 bis +120	-50 bis +110
Wärmeleitfähigkeit, λ W/(m*K)	0,032	0,038	0,028	0,033
U-Wert ⁷ W/(m ² *K)	2,7	3,5	2,8	3,3
Brandschutz	Schwer entflammbar		Schwer entflammbar	Schwer entflammbar
Schichtdicke mm	10	10	10	10
Kosten €/m ²	8,76	12,47	55	16
Firma	Sansys	Sansys	Reiff	Pohl Isolierung
Standardformat mm	117x56		2000x1000	10000x1000
Schichtdicke nach Produktion mm	10 bis 240		1 bis 12	3 bis 50

Ein weiterer Dämmstoff ist Polyurethan-Hartschaum (Kurzbezeichnung: PUR), was im Bauwesen seit den 1960er Jahren als äußerst leistungsfähiger Dämmstoff verwendet wird. [68] Polyurethane sind duroplastisch⁸, leicht, robust, druckfest, wasserabweisend, haben eine hohe Elastizität, lassen sich gut schneiden, spannen sowie stanzen. Im Vergleich zum Polystyrol hat das PUR bessere Dämmwerte, es ist langlebiger und effizienter. Im Gegensatz zu dem Polystyrol-Abfall, welches für keine hochwertigen Rezyklate hergestellt werden kann [69], ist Polyurethan recyclingfähig. Hierfür benötigt man jedoch eine Menge Energie für die Recyclingsanlagen.

⁷ Der U-Wert für die Dämmstoffplatten wird folgendermaßen berechnet: $U = \lambda/d$, wo d - Dicke der Schicht in m und λ - Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K) ist.

⁸ Duroplastischer Kunststoff ist ein Kunststoff, welcher nach der Aushärtung nicht mehr verformt werden kann, bleibt also form- und dimensionsstabil auch bei hohen Temperaturen.

Bei der nächsten Produktgeneration, die oft als Polyisocyanurat- oder Polyiso-Hartschaum (Kurzbezeichnung: PIR) bezeichnet wird, handelt es sich um die Weiterentwicklung des klassischen PUR. Während bei der Herstellung von PUR die Bestandteile MDI⁹ und Polyol im Verhältnis zu den Molekülmassen umgesetzt werden, ist bei der Herstellung von PIR, MDI im Überschuss vorhanden. Die MDI-Komponente reagiert dann teilweise mit sich selbst. Dadurch entsteht PIR, ein sehr stark vernetzter Kunststoff mit ringartigen Strukturen, die für die guten thermischen und physikalischen Eigenschaften des Materials verantwortlich sind. Das PIR ist dauerhaft, elastisch, formstabil und hat eine hervorragende thermische Beständigkeit.

Zuletzt wird der Elastomerschaum behandelt. Hierbei handelt es sich um einen Dämmstoff aus geschäumtem Synthetikgummi. Seine Dämmwirkung wird durch den Einschluss ruhender Luft bzw. von Treibgasen in den aufgeschäumten Zellen erzeugt. Bei dem Herstellungsprozess wird der Gummimischung Flammschutzmittel beigegeben, welches dann mit einem Treibmittel aufgeschäumt wird. In dieser Art und Weise wird vernetzter Gummi erzeugt, der einerseits formfest, andererseits aber elastisch verformbar ist. Solche Elastomere können sich gut bei der Zug- und Druckbelastung verformen, nehmen danach aber wieder ihre ursprüngliche Form an. Diese Eigenschaft ist vor allem für die Außenwandtemperierung in Form der Schlitzanordnung sehr vorteilhaft. Dank seiner Mikrozellstruktur lässt sich der Stoff gut schneiden, verarbeiten und ist zudem wasserabweisend. Mit seinem wiederverwendbaren Rohstoff eignen sich Elastomere nach ihrer Lebensdauer zur Herstellung originären und neuen hochwertigeren Produkten. [70]

Da die Ressourcen unserer Erde begrenzt sind, ist es von großer Wichtigkeit, dass wir nur das nehmen, was wir wirklich brauchen und zudem die verbleibenden Ressourcen für die nachkommenden Generationen schützen. Deswegen sollten bei der Auswahl eines passenden Dämmstoffes sowie eines anderen Materials für die Außenwandtemperierung, nicht nur seine thermischen und physikalischen Eigenschaften, sondern auch die energetischen Aspekte bei der Herstellung und dem nachfolgenden Recycling, beachtet werden. Die Elastomere umfassen die beiden Aspekte und passen somit gut für die Außenwandtemperierung. Eine gute Variante aus dieser Kunststoffgruppe, ist der Dämmstoff Armaflex von der Firma „Pohl Isolierung“.

4.7.3 Füll- und Putzstoffe

Im letzten Schritt der Außenwandtemperierung, werden die Hohlräume mit einem Füllstoff gefüllt und anschließend mit einer dünnen Putzschicht (von ca. 2 cm) verlegt.

⁹ Polymeres Diphenylmethandiisocyanat (PMDI) auch Technisches MDI genannt, ist ein Stoffgemisch aus Methylendiohenylisocyanaten und homologen aromatischen Polyisocyanaten.

Bei der Auswahl von einem Füll- und Putzmittel, müssen die bauseitig vorhandenen konstruktionstechnischen Besonderheiten berücksichtigt werden. Berücksichtigt werden hierbei z.B. die Elastizität, die Feuchtigkeitsempfindlichkeit und - was auch im Rahmen einer Außenwandaktivierung wichtig ist - Wärmeleitfähigkeit. Durch spezielle Zusätze können die Eigenschaften, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, noch zusätzlich erhöht werden.

Putze sind gebundene Stoffe. Die Hauptinhaltsstoffe sind in der Regel Sand und Wasser. Sie enthalten zudem auch mineralische und nicht mineralische Bindemittel wie Kalk, Gips, Zement oder Lehm. In Tabelle 5 sind die technischen Parameter verschiedener Putzsysteme aufgelistet. Die am meisten eingesetzten Putzarten für den Innenbereich sind Gipsputz sowie Kalkzementputz. Die beiden Putzarten sind baubiologisch unbedenklich und in der ökologischen Bauweise einsetzbar.

Tabelle 5: Technische Parameter der Putzsysteme [72]

Putzart		Gipsputz	Kalkputz	Kalkzementputz	Estrichzement	Ziegel
Materialkomponente		Gips	Kalk	Kalk, Zement	Sand, Zement	Ton
Druckfestigkeit	N/mm ²	2	2,5	3,5-5,0	25-35	0,38-0,52
Wärmeleitfähigkeit [73]	W/(m*K)	0,35	0,87	0,87	1,4	0,38-0,52
Spezifische Wärmekapazität [73]	J/(kg*K)	1090	960	800	1000	920

Der Gipsputz ist der am häufigsten verwendete Innenputz für Wohnhäuser und gilt als hochwertiger Standard bei allen gängigen Innenausbauarbeiten. [71] Das liegt vor allem daran, dass er sehr feinkörnig und glatt ist, wodurch er sich gut verarbeiten lässt und außerdem von der Natur aus schwer entflammbar ist. Gips ist feuchtigkeitsregulierend und atmungsaktiv, jedoch nicht wasserabweisend und witterungsfest, weshalb er deswegen nur für geschützte und innenliegende Wände geeignet ist (Feuchtigkeitsanteil bis etwa 65%). Bei größerer Feuchtigkeit wird das Material schnell brüchig, weicht auf und verliert an Halt. Robuster und wasserabweisend verhält sich dagegen Kalkzementputz. Dieser ist besonders widerstandsfähig sowie frostfest, und kann z.B. in der Waschküche oder sogar im Außenbereich verwendet werden. Zudem ist es Stoß- und Kratzfest, jedoch wegen des Zementanteil spröder und daher anfälliger für Spannungsrisse. In der Regel ist es auch bis zu 30% teurer als Gipsputz. Es ist auch stoß- und kratzfest, jedoch wegen des Zementanteil spröder und daher anfälliger für Spannungsrisse. Es ist auch in der Regel bis zu 30% teurer als Gipsputz.

Mineralische Kalkputze sind atmungsaktiv, feuchtigkeitsregulierend, jedoch nicht wasserabweisend. Aufgrund ihrer Alkalität wirken sie außerdem desinfizierend und verhindern die Algen- und Schimmelbildung. Es ist wie die beiden anderen Putzarten baubiologisch und ökologisch unbedenklich.

4.8 Infrarotheizung (IRB)

Infrarotheizungen sind Systeme, die mit Hilfe elektromagnetischer Wellen heizen. Sie werden auch als Strahlungs- oder Wärmewellenheizung bezeichnet. Im Gegensatz zur konventionellen Heizung mit Radiatoren wird durch sie nicht die Raumluft erwärmt, sondern die umgebenden Flächen und Körper, die die Wärme anschließend wieder an die Raumluft abgeben. [74]

Infrarotheizungen können als Hochtemperaturstrahler, auch Hellstrahler genannt, oder als Niedertemperaturstrahler, auch Dunkelstrahler, ausgeführt werden. Sie unterscheiden sich wesentlich durch die erreichten Temperaturen. Aufgrund des Prinzips, dass eine heißere Fläche mehr Infrarotstrahlung abgibt, können Hochtemperaturstrahler Temperaturen bis zu 300 °C erreichen. Sie werden in direkter Nähe daher als unangenehm warm empfunden. Zudem geht von ihnen ein Verbrennungs- und Brandrisiko aus. Niedertemperaturstrahler erreichen dagegen Temperaturen von nur etwa 90 °C. [75] Diese Temperatur wird bei einer Berührung für den Menschen zwar als heiß empfunden, führt aber nicht zu Verbrennungen. Auch eine Brandgefahr besteht bei diesen nicht. Daher sind sie für den Wohnraum gut geeignet. [76]

Infrarotheizungen bieten gegenüber anderen Heizsystemen Vorteile, aber auch Nachteile, welche es für die individuelle Situation abzuschätzen gilt. Einer der wesentlichen Vorteile einer Infrarotheizung ist die thermische Behaglichkeit. Die durch die Infrarotheizung abgegebene Strahlungswärme ähnelt der Sonneneinstrahlung und ist für den Menschen besonders angenehm. Das Heizsystem wird mit Strom betrieben und kann daher, falls ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien vorhanden ist, klimaneutral betrieben werden. Auch die Designvielfalt bietet einen Vorteil. Infrarotheizungen können beispielsweise in einen Spiegel oder ein Bild integriert werden, als mobiles Standgerät verwendet oder an der Decke oder den Wänden fest angebracht werden. Durch den einfachen Aufbau ist zudem der Wartungsaufwand gering. Auch kann die Installation einer Infrarotheizung durch die Erwärmung der Flächen und Körper zu einem Austrocknen dieser beitragen und so zum Schutz vor Schimmel dienen. Durch die punktuelle Wärmeabgabe eignen sich Infrarotheizungen zudem beispielsweise zur Beheizung einzelner Bereiche in großen Hallen. [76]

Einer der wesentlichen Nachteile ist, dass die Nutzung von Infrarotheizungen nicht in jeder Situation wirtschaftlich ist. So sind zwar die Anschaffungs- und Wartungskosten für dieses System niedrig, jedoch die Betriebskosten durch die Beheizung mit Strom vergleichsweise hoch. Ein wirtschaftlicher Einsatz ist daher meist nur in gut gedämmten Neubauten oder in Räumen, die nicht regelmäßig genutzt werden, gegeben. Für die Anwendung von Infrarotheizungen in unregelmäßig genutzten Räumen spricht zudem, dass sie eine kurze Reaktionszeit haben und somit ein schnelles und flexibles Reagieren ermöglicht. [77]

4.9 Nutzerverhalten (IRB)

Das Nutzerverhalten bestimmt maßgeblich den Energieverbrauch in Gebäuden. Die verschiedenen Einflussmöglichkeiten der Nutzer reichen dabei von der Bestimmung der Raumtemperatur über das Lüftungsverhalten bis zur Warmwassernutzung. Ebenfalls sind Faktoren wie die Häufigkeit der Nutzung von Räumen und innere Wärmequellen, beispielsweise durch elektronische Geräte, die Wärme abgeben oder der Grad der Verschattung des Tageslichtes wesentlich. Auch die Bedienung der Anlagentechnik und die Möblierung spielen eine Rolle. Der Nutzer hat insgesamt durch eine Vielzahl von Faktoren Einfluss auf den Energieverbrauch. [78]

Die wesentlichsten Faktoren sind die Raumtemperatur und das Lüftungsverhalten. Auch wenn die individuellen Komfortansprüche eine große Spannbreite aufweisen, so gibt es jedoch eine klare Tendenz zu Raumtemperaturen von über 20 °C. Ältere Menschen haben dabei ein größeres Bedürfnis nach Wärme (22 °C oder mehr) als jüngere. Eine solche Erhöhung der Raumtemperatur kann – je nach Dämmstandard des Gebäudes – zu einer Erhöhung des jährlichen Energieverbrauches von 8 kWh pro Quadratmeter Wohnfläche (Altbau saniert/Niedrigenergiehaus) pro Grad höherer Raumtemperatur führen. [78]

Zum Vergleich: Der durchschnittliche jährliche Energiebedarf, der aus Energieausweisen ermittelt wurde, liegt zwischen 114 (Mehrfamilienhaus, saniert) und 130 kWh (Einfamilienhaus, saniert) pro Quadratmeter Wohnfläche. [79] Ebenso wie die Raumtemperatur ist auch das Lüftungsverhalten individuell verschieden und hat einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch. So wird tendenziell in etwa einem Drittel der Haushalte auch während der Heizperiode bei der geöffneten Feste geschlafen. Die jährlichen Verluste dadurch können grob auf etwa 10 kWh pro Quadratmeter Wohnfläche abgeschätzt werden. [78]

Ein wichtiger Aspekt in Zusammenhang mit dem Nutzerverhalten nach einer energetischen Sanierung ist der Rebound-Effekt. Als Rebound-Effekt bezeichnet man die Änderung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen beispielsweise nach einer Sanierung.

So wird durch die Tatsache, dass durch eine Sanierung der Verbrauch niedriger und damit das Heizen günstiger wird, mehr geheizt. Räume, die man zuvor etwas kälter ließ, werden nach der Sanierung auf eine höhere Raumtemperatur geheizt. [80] Auch hinsichtlich des Lüftungsverhaltens gibt es diesen Effekt. So wird zumeist auch nach dem Einbau einer maschinellen Lüftungsanlage nicht auf das Fensteröffnen verzichtet. [78]

4.10 Sozialwissenschaftliche Aspekte einer Gebäudesanierung (IREES)

Zufriedenheiten mit der Wohnung allgemein, mit dem Raumklima – insbesondere mit der Raumtemperatur und Temperaturdifferenz innerhalb eines Raumes – sind die Faktoren, die bei der Behaglichkeit der Nutzenden eine große Rolle spielen. Bei Heizkörpern steigt die warme Luft auf, kühlt ab und fällt als kalte Luft am Boden ab. Die Temperaturdifferenz beträgt etwa 5 °C. Der Mensch fühlt sich unbehaglich (s. Abbildung 17 a). Die Wärmestrahlen einer Flächenheizung breitet sich im rechten Winkel zur Fläche aus. Treffen die Wellen auf einen festen Körper – auf Einrichtungsgegenständen, Fußboden oder auf den Menschen – werden sie in Wärme umgewandelt. Die festen Körper geben die aufgenommene Energie wieder als Wärme an den Raum ab (s. Abbildung 17 b).

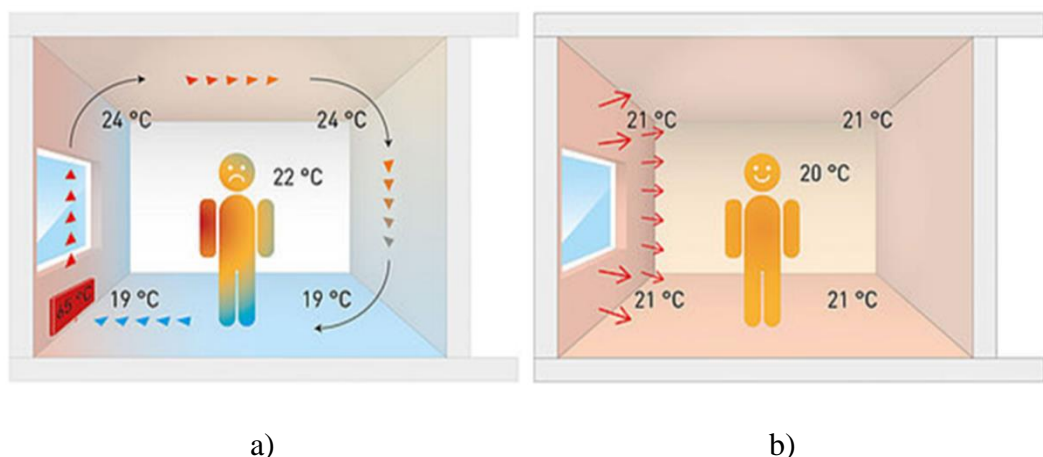


Abbildung 17: Vorlage zur Erläuterung von a) Konvektionsheizung und b) Flächenheizung im Vergleich [81]

Die Luftgeschwindigkeit beeinflusst wesentlich, ob wir uns im Raum wohlfühlen oder nicht. Im Freien stören die Luftbewegung dem Menschen kaum. In geschlossenen Räumen empfinden sie diese aber rasch als unangenehm. Dies ist ebenfalls bei Klimaanlage

im Sommer stark zu spüren. Schlecht isolierte Glasflächen bzw. Wände ist auch der Fall im Winter.

Die Methode der Wandaktivierung ermöglicht die Temperaturdifferenz sowie die Luftbewegungen im Raum zu minimieren. Somit steigt die Zufriedenheit der Nutzenden, thermischer Komfort im Winter und Behaglichkeit allgemein hoch.

4.10.1 Akzeptanz neuer Technologien

In der Abbildung 18 wird die Alterststruktur des Renatablockes dargestellt. Allerdings handelt es sich dabei, um das Alter der Personen, die den Vertrag mit der Genossenschaft geschlossen haben. Handelt es sich dabei um junge Familien, deren Anzahl laut Aussage der Genossenschaft stetig steigt, werden die Kinder nicht mit in der Statistik aufgenommen. Dennoch wohnen im Renatablock überwiegend ältere Personen. Für die Umstellung ist dies mit Hinsicht auf die Nutzerakzeptanz zu beachten, da die Wohnungen bei Modernisierung auch die Anforderungen älterer Bewohner entsprechen sollten, wie z. B. größere Bewegungsflächen im Badezimmer.

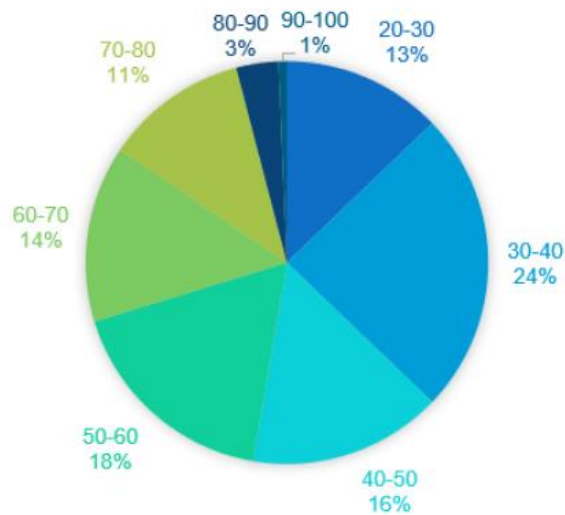


Abbildung 18: Altersstruktur Renatablock [82]

4.10.2 Erfolgsfaktoren und Hemmnisse der Gebäudesanierung auf Sicht der Nutzenden

Im Zusammenhang mit der Auswirkung auf das Raumklima und dem Wohnkomfort sind bei einer Außenwandaktivierung folgende Faktoren wichtig: Sanierungskonzept, mit seinen spezifischen technisch-bauphysikalischen relevanten Aspekten, Sanierungsablauf und wie er den Wohnalltag der Nutzenden beeinflussen kann, sowie auch die Mitwirkung der Nutzenden beim Prozess. Informations- und Kommunikationsbedarf liegt im Zusammenhang mit der Sanierung häufig als ein Aspekt der Unzufriedenheit der Nutzenden. Ein Informationsaustausch vor in der Zeit der Sanierungsmaßnahmen eine große Rolle auf Sicht der Nutzenden. Von großer Wichtigkeit ist der konkrete Sanierungsablauf in Hinblick auf Konsequenzen für den Wohnalltag. Sanierungsarbeiten im bewohnten Zustand sind sehr vorteilhaft im Gegensatz zur kompletten Sanierung der Außenwände nicht nur auf Sicht des Ökosystems und Klimaschutzes aber auch auf Sicht der Nutzenden. Nebenkosten für Heizenergie, die nach der Sanierung deutlich weniger sein sollen, spielen auf Sicht der ökologische und ökonomische Nutzen auch eine große Rolle und wirkt als Erfolgsfaktor im System. Eine Nutzung des Systems zur Kühlung im Sommer geht sicher auch als Vorteil.

4.11 Bauleistungsplanung

Durch die Bauleistungsplanung werden alle organisatorischen Punkte eines Bauprojekts geregelt. Das Ziel ist den Zeitaufwand und die Kosten so gering wie möglich zu halten. Dies ist unter anderem durch eine genaue Planung des Bauablaufs und der Koordinierung der Gewerke möglich. Es werden auch die Planung der Baustelleneinrichtung und die Infrastrukturelle Anbindung der Baustelle im Vorfeld geprüft und geplant. [83]

- Bauablaufplan
- Koordination von Gewerken
- Infrastrukturelle Anbindung der Baustelle
- Planung der Baustelleneinrichtung
- Flächen für Materiallagerung
- Maßnahmen zur Minderung von Baulärm und Bauschmutz

LEISTUNG		BAUHERR Auftraggeber / Projektsteuerer	PLANER Objektplaner/ Baulogistikplaner	AUFTRAGNEHMER Unternehmer / Baulogistiker
	Bedarfsplanung	Entwickeln von baulogistischen Zielen		
LPH 1	Grundlagenermittlung	Entscheidung zur Beauftragung einer Baulogistikplanung	BAULOGISTIKBERICHT	
LPH 2	Vorplanung	Überprüfung der Einflussgrößen	Baulogistikplanung der Vorplanung	
LPH 3	Entwurfsplanung	Aktualisierung der Einflussgrößen	Baulogistikplanung des Entwurfs	
LPH 4	Genehmigungsplanung	Erwirken der Baugenehmigung	BAULOGISTIKKONZEPT	
LPH 5	Ausführungsplanung	Aktualisierung der Einflussgrößen	Entwicklung Baulogistikhandbuch	
LPH 6	Vorbereiten der Vergabe	Prüfung der Einflussgrößen	BAULOGISTIKHANDBUCH	
LPH 7	Mitwirken bei der Vergabe	Entscheidung zur Beauftragung	Prüfung und Wertung der Angebote	Kalkulation / Arbeitsvorbereitung
LPH 8	Objektüberwachung		BAULOGISTIKCONTROLLING Überwachung / Abrechnung	Ver- / Entsorgungslogistik Baustellenlogistik Informationslogistik
LPH 9	Dokumentation		Bericht	

Abbildung 19: Baulogistikprozessmodell [83]

4.11.1 Bauablaufplanung

Um ein Bauprojekt Kosten- und zeiteffizient zu realisieren, müssen die einzelnen Abläufe vor Beginn der Maßnahme genau geplant und umgesetzt werden. Jede Baumaßnahme ist einzigartig, da die Nutzung, die Wünsche der Bauherren, die Technische Ausstattung, die örtlichen Gegebenheiten usw. immer unterschiedlich sind. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, dass alle Faktoren, die vorab bekannt sind, geplant werden. Der Bauablaufplan ist die Grundlage dafür, ein Projekt mit größtem Erfolg umzusetzen. Anhand des Bauablaufplans können Kontroll- und Steuerungsmaßnahmen ausgearbeitet werden. Die Baufirmen können ihre Mitarbeiter und Arbeitszeiten für ein Projekt im Vorfeld genauer planen. Es wird auch gewährleistet, dass die Gewerke untereinander koordinierter Arbeiten und sich auf der Baustelle nicht gegenseitig bei der Ausführung ihrer Arbeiten hindern. Durch unvorhersehbare Faktoren wie schlechtem Wetter, Lieferengpässen von Baumaterial oder Schäden Bau der Bauausführung kann es immer wieder zu Änderungen beim Bauablaufplan geben. Deshalb sollte der Bauablaufplan mit genug Reservearbeits-tagen erstellt werden. Der Bauablaufplan ist kein festgeschriebenes Gesetz und wird den Gegebenheiten auf der Baustelle angepasst. Trotzdem sollte sich jeder auf der Baustelle an den Plan halten, um eine ressourcenschonende und zeitgerechte Fertigstellung des Bauvorhabens zu erreichen.

Die vereinbarten Termine und Kosten sollen durch die effiziente Planung und Ausführung bei Bauprojekten eingehalten werden. Dabei müssen die energetischen, ästhetischen und ökologischen Vorgaben des Gesetzgebers und Bauherren eingehalten werden. Die reibungslose Realisation von Bauprojekten wird durch das Baumanagement in Zusam-

menarbeit mit den Fachplanern, Architekten und Fachfirmen gewährleistet. Die Projektsteuerung ist dabei die kern Aufgabe des Baumanagements, um die Kosten, Termine und Qualität der ausgeübten Aufgaben zu kontrollieren. [85]

Für das EfTecSo-modIn Projekt wurde ein Muster Bauablaufplan erstellt (s. Abbildung 21). Anhand dieser Planung können Arbeitsschritte und Gewerke koordiniert werden.

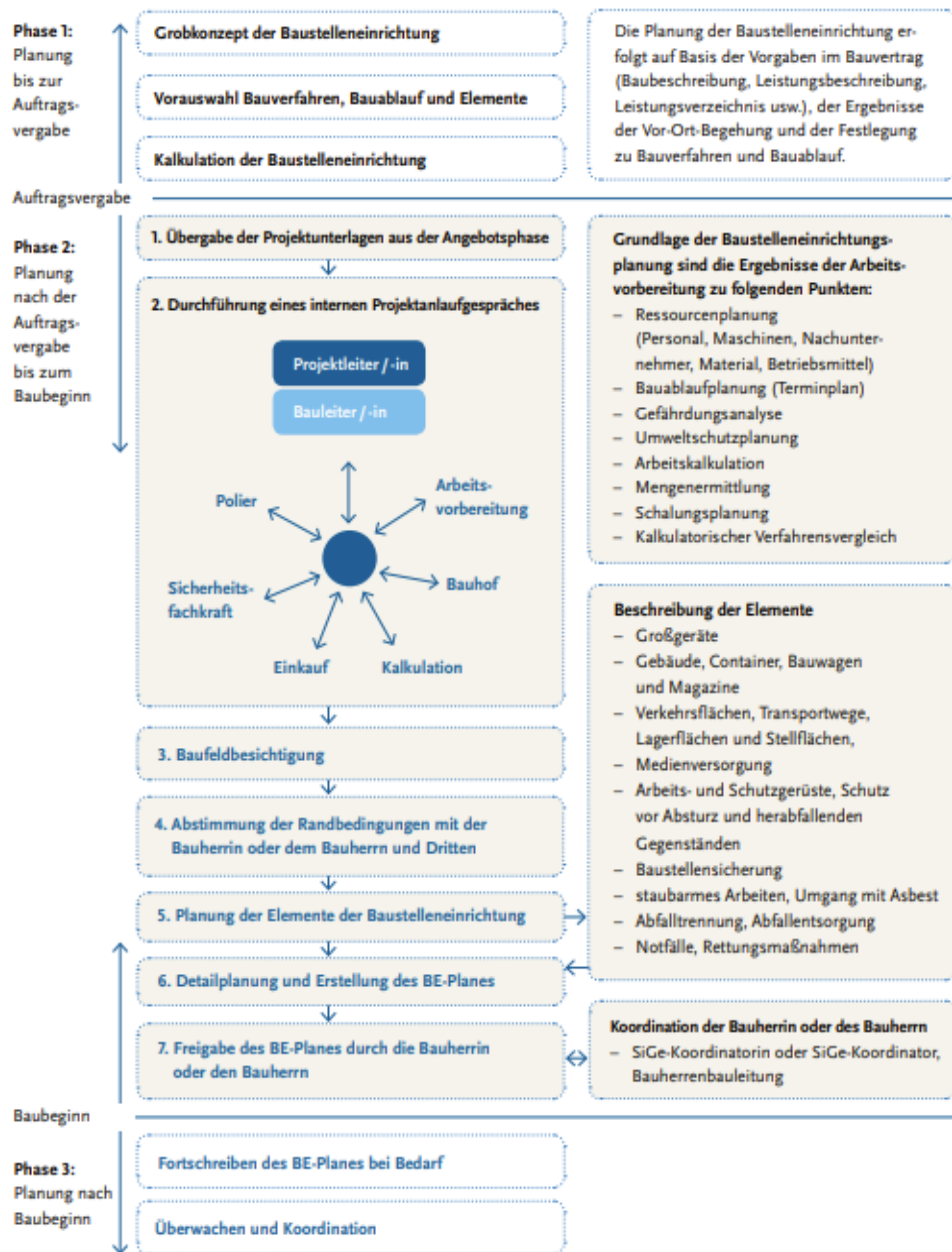


Abbildung 20: Ablauf der Baustelleneinrichtungsplanung im Überblick [84]

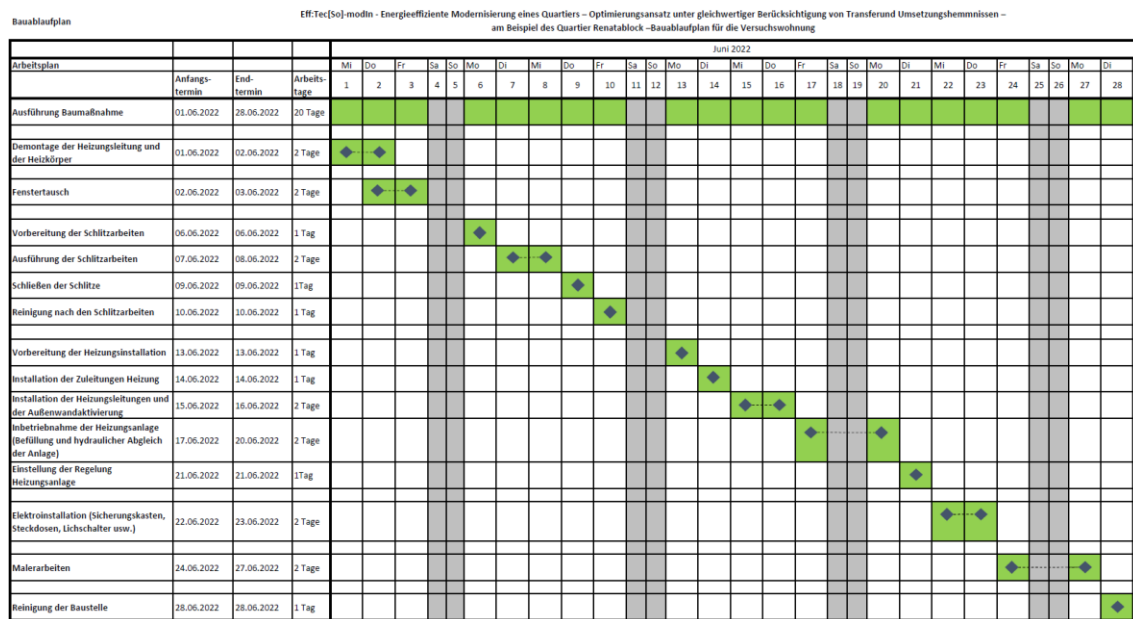


Abbildung 21: Bauablaufplanung Versuchswohnung

4.11.2 Koordination von Gewerken

Der Bauablaufplan ist die Grundlage für eine erfolgreiche Koordinierung der Gewerke. Neben dem Bauablaufplan, der eine Planung der Arbeitstage der jeweiligen Gewerke definiert, ist es auch wichtig, dass die Handwerker der Gewerke kontrolliert und koordiniert werden. Der Bauherr ist laut Baustellenverordnung verpflichtet, einen Koordinator zu beauftragen, wenn mehrere Auftragnehmer verschiedener Gewerke an den Ausführungsarbeiten des Bauprojekts tätig sind. Jedes Bauvorhaben ist einzigartig und muss den Umständen entsprechend geplant und umgesetzt werden. Die Einzigartigkeit bringt immer eine Komplexität mit sich, wodurch eine genaue Koordination unabdingbar ist. Die Bauleiter der verschiedenen Gewerke müssen die geplanten Bauabläufe dem Bauablaufplan entsprechend untereinander absprechen und umsetzen [86].

4.11.3 Infrastrukturelle Anbindung der Baustelle

Um die Baustelle mit den notwendigen Materialien und Baustoffen zu versorgen, muss die Versorgungslogistik geplant werden. Dafür werden Anlieferungsstrategien und Verkehrs Simulationen im Vorfeld bestimmt und geplant. Baustellen, die sich im innerstädtischen Raum befinden, stellen eine besondere Hausforderung dar, weil die verkehrstechnische Anbindung die Versorgung der Baustelle erheblich beeinflussen kann. Eine nicht ordnungsgemäß funktionierende Zulieferung von Materialien kann dazu führen, dass die festgelegten Termine hinsichtlich der Fertigstellung eines Projektes nicht eingehalten werden können. Aus diesem Grund muss die Versorgung im Vorfeld sorgfältig geplant

und ein Versorgungskonzept erstellt werden. Es muss ein Logistiknetzwerk erstellt werden, um die Baustelle ordnungsgemäß zu beliefern. Für dieses Logistiknetzwerk müssen Transport-, Umschlags-, Lagerprozesse, so wie die Informations- und Transaktion Prozesse geplant und umgesetzt werden. [87]

4.11.4 Maßnahmen zur Minderung von Bauschmutz

Bei Ausführungen von Bauarbeiten ist die Entstehung von Staub unausweichlich und gehört zum Alltag jeder Baustelle mit dazu. Aus diesem Grund sind die Bauherren und die Baufirmen verpflichtet, die Verbreitung von Baustaub zu vermeiden und einzudämmen. Die Einatmung von Baustaub führt auf Dauer zu Erkrankungen, die durch Maßnahmen vermieden werden können. Nach dem Arbeitsschutzgesetz werden Staub in einatembarer E-Staub und alveolengängigen A-Staub unterteilt. Unter E- Staub versteht man alle Staubarten, die einatembar sind. Der größte Teil dieser Staubpartikel setzt sich im Mund, Nase und den oberen Atemwegen ab. Durch Niesen, Husten oder Putzen der Nase werden die Staubreste aus dem Körper entfernt. Der A-Staub beschreibt Staubpartikel mit einem Durchmesser von ca. $1\mu\text{m}$, die sich in den Alveolen absetzen. Neben der hohen Staubentwicklung auf Baustellen ist auch zu beachten, dass der bei Bauarbeiten entstehende Staub krebserregende Stoffe wie z. B. Quarzstaub enthält. Wenn für Tätigkeiten, bei denen einatembarer Staub erzeugt wird, keine stoffbezogenen Arbeitsplatzgrenzwerte vorgeschrieben sind, müssen mindestens die Arbeitsplatzgrenzwerte für E- und A- Staub eingehalten werden. Nach dem Paragraphen § 22 Abs.1 BImSchG Gefahrstoffverordnung ist das trocken schneiden von Steinen und Betonteilen auf Baustellen verboten. Jedoch gehört diese Verfahrensweise immer noch zum Alltag einer jeden Baustelle. Um die Baustellenmitarbeiter zu schützen und das Risiko einer späteren Erkrankung zu minimieren, muss die Erzeugung von Baustaub entgegengewirkt werden. Folgende Maßnahmen tragen zu einer erheblichen Senkung und Beseitigung der Staubentwicklung bei:

- Nassschlitzen
- Luftreiniger
- Abgesaugte Handmaschine
- Bauenstauber
- Abschottungen bzw. Staubschutztüren

Diese Maßnahmen müssen durch die Bauherren und den Baufirmen eingeleitet und kontrolliert werden. Durch die oben genannten Maßnahmen wird die Erzeugung von Staub auf Baustellen minimiert bzw. staubfrei ausgeführt. Die Investitionskosten dieser Ausrüstung wird mit Arbeitsschutzprämien unterstützt. [26]

4.12 Heizkosten (IRB)

Innerhalb eines Mehrfamilienhauses können trotz der gleichen gebäudetechnischen Gegebenheiten große Unterschiede beim Wärmeverbrauch und damit auch bei den Heizkosten bestehen. Neben persönlichen Gründen, wie dem individuellen Heizverhalten, können auch die Lage der Wohnung im Gebäude oder das Vorhandensein von ungedämmten Rohrleitungen zu Differenzen bei der Nutzung der Heizung führen. [88]

Durch ungedämmte Rohrleitungen wird Wärme an die Umgebung abgegeben – an die Raumluft, umgebende Bauteile, etc. Wenn der Anteil der durch die Rohre abgegebenen Wärme hoch ist, kann dies die Berechnung der Heizkosten erheblich beeinflussen. Wohnungen, durch die solche Rohrleitungen führen, profitieren von der abgegebenen Wärme und müssen daher weniger über die Heizkörper beheizt werden. Eine Berechnung der Heizkosten rein über die Verbräuche trägt diesem nicht Rechnung. Daher kann in Gebäuden mit ungedämmten und freiliegenden Rohrleitungen der Wärmeverbrauch der Nutzer nach anerkannten Regeln der Technik (Norm VDI2077 – Beiblatt Rohrwärme) ermittelt werden. [88]

Auch die Lage einer Wohnung im Haus kann den Verbrauch an Heizwärme beeinflussen. Eckwohnungen oder Wohnungen, die im obersten oder untersten Geschoss liegen, haben einen höheren Wärmebedarf als innenliegende Wohnungen. [89] Um diesen Bedingungen Rechnung zu tragen, bietet die Heizkostenverordnung die Möglichkeit, anteilig die Höhe der Kosten an der Wohn- bzw. Nutzfläche festzumachen. Dadurch werden die Kosten nicht rein über den Verbrauch der einzelnen Wohnung berechnet. [90]

Jedoch gibt es auch eine Vielzahl anderer Ansätze für die Berechnung der Heizkosten. Eines davon stellt beispielsweise der Ansatz einer Warmmiete dar, die für alle Bewohner eines Mehrfamilienhauses gleich ist. Dabei werden Heiz- und Warmwasserkosten auf alle Mieter gleich angerechnet. Eine Studie der IWU von 2012 zeigt, dass in Passivhäusern, in denen aufgrund des sehr geringen Heizwärmebedarfs das eigene Verhalten nur sehr wenig Einfluss auf die benötigte Wärmemenge hat, dieser Ansatz von den meisten Mietern (gut) angenommen wird. Dieses Modell findet bisher noch recht selten Anwendung. [91] Ein weiteres Konzept, welches zurzeit erprobt und untersucht wird, ähnelt dem Konzept der Warmmiete. Im Forschungsprojekt Eversol wird von allen Mietern eine über fünf Jahre garantierte, stabile Pauschalmiete verlangt, die Wohnen, Wärme und Strom als Flatrate beinhaltet. [92]

5 Methodik

Das Forschungsprojekt soll verschiedene Aspekte einer thermischen Bauteilaktivierung untersuchen. Dabei wird zum einen der Einfluss auf die Behaglichkeit eines Raumes betrachtet und zum anderen die Auswirkungen auf den Energiebedarf. Die bauphysikalische Umsetzbarkeit ist ein weiterer Aspekt, welche durch verschiedene Messungen während des Aufbaus der Versuchswohnung untersucht werden soll. Die wichtigsten Untersuchungen beziehen sich auf den Energiebedarf und die Behaglichkeit des verbauten Systems. Jedoch wird auch die soziale Verträglichkeit untersucht. Folgende Abbildung 22 zeigt die Arbeitspakete des Vorhabenprojektes (s. Abbildung 22).



Abbildung 22: Übersicht der Arbeitspakete

Seitens des Fraunhofer IRB wurde eine Analyse verfügbarer Daten durchgeführt, welche dem Projekt zugeführt werden.

5.1 Wissenstransfer im Forschungsvorhaben (IRB)

Die Ergebnisse des Projekts werden in Form von Flyer, Informationsbroschüren, Vorträgen bei Fachkonferenzen, Workshops, sowie Artikeln, Poster und Publikationen veröffentlicht und publiziert. Alle Projektinformation sowie die Ergebnisse des Vorhabens finden auch durch Open Source Software weitere Verbreitung. Außerdem wird eine Wissensplattform für das Projekt eingerichtet und für die breite Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Unterstützt wird die Projektarbeit durch begleitende Bachelor- und Masterarbeiten.

5.1.1 Methodische Darstellung

Vorgehen Recherche, Erstellung Faktentexte, Kontinuierliche Zuarbeit und Auswertung von Fachinformationen für "TGA" und sozialwissenschaftlichen Part

5.1.2 Außendarstellung des Projektes

- Projektwebsite (Informationsplattform): Aufbau und projektbegleitende Systematik
- Transfer des Projekts: Publikationen, Fachveranstaltungen, Website, Social Media

5.2 Sozialwissenschaftliche Vorgehensweise

Die Kommunikation mit Bewohner vor und während der Sanierungsarbeiten spielt eine große Rolle, soll offen und vollständig sein und transparent mit Umgang mit Problemen. Der Informationsaustausch soll rechtzeitig erfolgt, möglichst mit mehreren Monaten Vorlaufzeit, auch wegen geplanter eigener Renovierungsarbeiten in der Wohnung. Es sollen verschiedene Kommunikationswege genutzt werden wie Aushänge, Einwürfe, regelmäßige E-Mails, Informationen auf der Homepage der Baugenossenschaft usw.

Um möglichst alle Fragen durch den Informationsaustausch zu beantworten sowie alle Bedürfnisse zu erfüllen können regelmäßige Interviews mit Bewohner vor, während und nach den Sanierungsarbeiten durchgeführt werden. Diese sollen folgende Aspekte zu beachten:

- thermischer Komfort in der Wohnung
- Behaglichkeitsbedürfnisse und Einfluss auf die Raumtemperatur
- Methode und die Umsetzung auf Sicht der Nutzenden

- Sanierungsmaßnahmen im bewohnten Zustand: konkrete Umsetzung, Zeitplan, Vorbereitung der Wohnung und Nachreinigung, Raumnutzung während und nach den Sanierungsarbeiten etc.
- Optimierungsmöglichkeiten (z.B: Fensteraustausch u.ä.)
- Ökologischer und ökonomischer Nutzen und Energiekosten

Eine sorgfältige Kommunikation zwischen Baugenossenschaft und Mietenden im Vorfeld, während und nach den Sanierungsarbeiten sowie ein kompetenter Informationsaustausch spielt eine große Rolle und soll regelmäßig durchgeführt werden.

5.3 Technische Bestandsdatenanalyse

Die technische Bestandsdatenanalyse soll das Gebäude im Ist-Zustand abbilden. Dafür wird folgendermaßen vorgegangen: Begehung, Aufmaß, Abgleich mit Bestandsplänen, Fotodokumentation, Messung physikalischer und bauphysikalischer Parameter.

Als Ergebnis erhält man eine Referenz für Berechnungen und Simulationen, welche als Bewertungsgrundlage für Optimierungsmaßnahmen dienen. Auf Grundlage der Referenzanalyse können die einzelnen Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen anschließend hinsichtlich ihrer Wirkung und Kosten bewertet werden.

5.4 Wetterdatenanalyse

Um verschiedene klimatische Szenarien zu definieren, wurde eine Wetterdatenanalyse durchgeführt. Dafür wurden die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Die Testreferenzjahre werden vom Deutschen Wetterdienst veröffentlicht und sollen für eine bestimmte Klimaregion den typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Sie beruhen auf einer statistischen Auswertung bisheriger Wetteraufzeichnungen. Die Datensätze werden vor allem für Simulationen und Berechnungen im heizungs- und raumluftechnischen Bereich verwendet. Der zuletzt veröffentlichte Datensatz 2017 beinhaltet das Testreferenzjahr 2015, welches den Zeitraum 1995 bis 2012 repräsentiert und das Testreferenzjahr 2045, welches den Zeitraum 2031 bis 2060 darstellt und eine Prognose des klimatischen Wandels einbezieht. [93] Der prognostizierte typische Temperaturverlauf für die Jahre 2031 bis 2060 soll es Planern für Gebäudetechnik ermöglichen, auch zukünftige klimatische Anforderungen bei einer längeren Betriebsdauer zu berücksichtigen, indem dieser in Simulationen integriert werden kann.

5.5 Simulationen mit CFD

Für die Auslegung des Versuchsraumes wurde ein 3D-Modell der Außenwand erstellt. In diesem Modell wurden verschiedene Leitungsführungen implementiert und es wurden weitere verschiedene Parameter variiert. Für die Bewertung der verschiedenen Modelle wurden die Energieflüsse betrachtet. Dabei ist der Energiefluss an der raumluftberührenden und an der außenluftberührenden Wandoberfläche interessant. Zur Findung der Variante, welche ausgeführt werden soll, sollten bestimmte Kriterien erfüllt sein.

1. Der Abstand zur Wandoberfläche sollte größer als 60 mm sein, was als Schutz vor unachtsamen Mietern dienen soll, welche ohne Absprache in die Außenwand bohren oder nageln.
2. Die raumseitige Wärmeabgabe soll maximal sein.
3. Der Wärmefluss in Richtung der Außenluft soll minimal sein.
4. Die Statik darf nicht stark beeinflusst werden

Es wurden also folgende Parameter untersucht:

- Verschiedene Leitungsführungen wurden simuliert
 - Rohrteilung (Achsabstand) variiert
 - Gesamtleitungslänge variiert
- Verschiedene Dimensionen (Rohr, Überdeckung)
- Dämmung im Schlitz hinter dem Rohr
- Einfluss U-Wert Fenster
- Verschiedene Szenarien für Innen- und Außentemperatur

Das Hauptuntersuchungsziel der CFD-Simulationen ist die Deckung der Grundheizlast. Also bei welchen Parametern die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste gedeckt werden können. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.²³ zeigt einen Ausschnitt verschiedener Leitungsführungen.

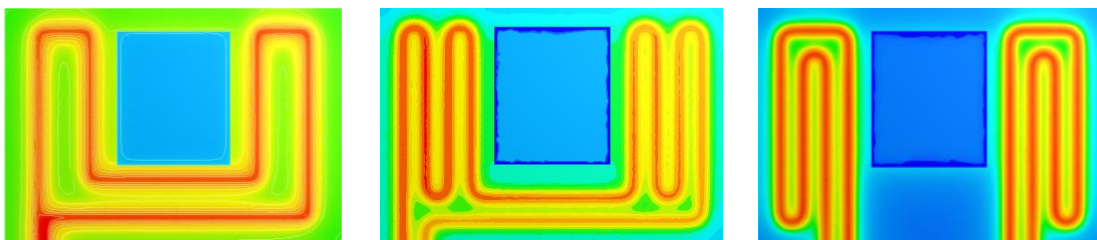


Abbildung 23: Verschiedene Leitungsverläufe in CFD

Die Grundheizlast wird im Projekt so definiert, dass die Wohnung bis zu einer gewissen minimalen Außenlufttemperatur von -5 °C über die Außenwandaktivierung beheizt werden kann. Bei niedrigeren Temperaturen werden individuelle zusätzliche Heizsysteme (Heizkörper, Infrarotheizung, usw.) verwendet. Die späteren Messungen im Reallabor sollen zeigen, wie leistungsfähig die Außenwandtemperierung ist.

5.6 Simulationen mit IDA ICE

In den Simulationen mit IDA ICE wurde das gesamte Quartier analysiert. IDA ICE ist ein Programm zur Untersuchung des Raumklimas einzelner Zonen innerhalb eines Gebäudes sowie des Energieverbrauchs eines gesamten Gebäudes. Bei der Simulation mit IDA ICE werden sämtliche wichtige physikalische Effekte berücksichtigt und deren Einflüsse können quantifiziert werden. Zum Beispiel wurde zusätzlich der Effekt der Verschattung des Gebäudes durch Nachbargebäude oder Bäume auf den Energiebedarf untersucht. Weitere Aspekte wie die Tageslichtsimulation und die Behaglichkeit wurden neben der Energieanalyse aufgegriffen. Die energetische Bewertung des Quartiers erfolgt in zwei Phasen. Phase eins beinhaltet die Bewertung des Versuchsraumes und Phase zwei die Bewertung des gesamten Quartiers. Für die energetische Bewertung wurden mehrere Szenarien simuliert. Die jetzige Situation im Quartier mit konventioneller Heizung und Gas als Energieträger beschreibt ein Szenario. Das zweite Szenario bildet das Wandheizungssystem mit Fernwärme als Energieträger ab. Weitere Szenarien untersuchen die Einbindung einer Wärmepumpe mit Nutzung der Umweltwärme. Um die Simulationen durchführen zu können, mussten sämtliche U-Werte recherchiert, bzw. angenommen und weitere Rahmenbedingungen festgelegt werden.

Außerdem werden verschiedene Temperaturverläufe implementiert. Dafür werden die Testreferenzjahre verwendet, welche die Prognose für den Zeitraum 2030 bis 2060 und den gegenwärtigen durchschnittlichen jährlichen Temperaturverlauf beinhaltet.

5.7 U-Wert Messung

Im Zuge der Untersuchung des energetischen Optimierungspotentials eines Quartiers wird nach der Bestandsaufnahme der jeweiligen Objekt-Bauteile die Dokumentation des gesamten Gebäudezustands durchgeführt. Anhand der gemessenen Werte werden einerseits Schwachstellen ermittelt, die Ansatzpunkte für die Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen darstellen können und andererseits dienen die ermittelten U-Werte der Validierung für getätigte Annahmen bezüglich der Berechnungen zur Norm-Heizlast und Simulationen zur Wärmeübertragung. Im vorliegenden Protokoll werden die entsprechenden Messungen am betreffenden Gebäude bzw. an den Gebäudeteilen beschrieben und ausgewertet.

Für die Entwicklung von modularen Instandsetzungsverfahren unter Einbeziehung der Außenhülle des Gebäudes als thermisch aktivierte Fläche werden Norm-Heizlasten bestimmt und dreidimensionale Simulationen zur Wärmeübertragung durchgeführt. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist dabei von großer Bedeutung. Neben der Schätzung des U-Wertes durch die geometrische Untersuchung der Bauteile und den bei der Wohnungsbegehung ersichtlichen Materialien mit ihren entsprechenden Eigenschaften soll der U-Wert auch durch Messungen ermittelt werden. Von außen ist es beispielsweise nicht ersichtlich, ob in dem Mauerwerk ein Luftspalt eingearbeitet ist oder nicht.

Die Messung des Wärmedurchgangswertes (U-Wertes) kann mittels zwei Methoden erfolgen:

- Temperaturmethode nach DIN EN ISO 6946: Die gemessenen Basisgrößen hierfür sind **3** Temperaturen (innen, außen sowie eine Wandtemperatur)
- Wärmeflussmethode nach ISO 9869: Die gemessenen Basisgrößen hierfür sind **2** Temperaturen (innen, außen) und der Wärmefluss **q**

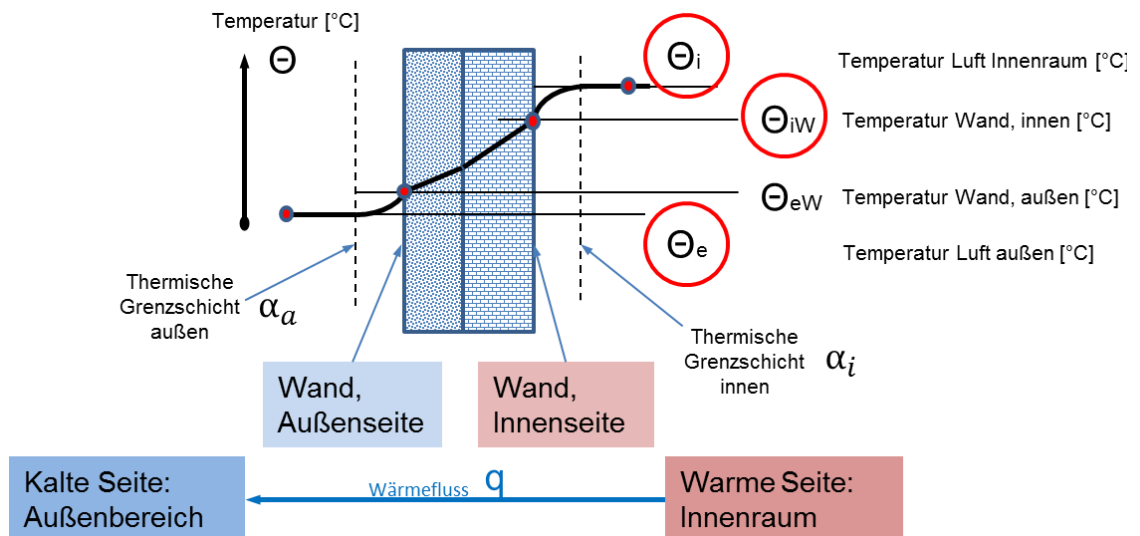


Abbildung 24: Messprinzip Temperaturmethode, Quelle: Katja Biek, BioClima

Die Berechnung des U-Wertes erfolgt gemäß folgender physikalischer Formeln (s. Gl. 7) aus der Theorie der Wärmeübertragung, die in den genannten Normen Anwendung finden:

$$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e} \quad \text{Gl. 7}$$

mit

U: Wärmedurchgangskoeffizient [W/m²K]

q: Wärmestromdichte [W/m²]

θ_e : Lufttemperatur, außen [°C]

θ_i : Lufttemperatur, innen [°C]

Dabei lässt sich der Wärmestrom anhand Gl. 8 bestimmen

$$q = \alpha_i \cdot (\theta_i - \theta_{i,W}) \quad \text{Gl. 8}$$

mit

$\theta_{e,W}$: Wandtemperatur, innen [°C]

θ_e : Lufttemperatur, innen [°C]

α_i : Wärmeübergangskoeffizient, innen

Daraus ergibt sich für den Wärmedurchgangskoeffizienten U folgende Gleichung:

$$U = \frac{\alpha_i \cdot (\theta_i - \theta_{i,W})}{\theta_i - \theta_e} \quad \text{Gl. 9}$$

Für die U-Wert-Berechnung wird an der inneren senkrechten Fläche der Außenwand ein Wärmeübergangskoeffizient von 7,69 W/(m² K) nach DIN EN 12831-1 angenommen.

Die Bedingungen für die Anwendbarkeit der obigen Berechnungen sind wie folgt:

- **Stationärer Zustand:** Die gemessenen Zustandsgrößen ändern sich während des Wärmetransports nicht oder sind über den betrachteten Zeitraum als gleichbleibend anzusehen.
- Das gesamte **treibende Temperaturgefälle** zwischen Innenluft und Außenluft beträgt mindestens **15 K**. Andernfalls ergibt die Berechnung der U-Werte streng nach Norm keine unmittelbar zuverlässigen Ergebnisse. D.h. die Einflüsse der einzelnen Wärmeübergangswiderstände (WÜ-Widerstände) sind in diesem Fall exakter in die Berechnung mit einzubeziehen. Mittelwerte sind selektiv für Intervalle mit einem ausreichenden treibenden T-Gefälle zu bilden und untereinander zu vergleichen.

Die Messung der U-Werte über T-Messungen und IR-Thermographie für Feldversuche werden vorzugsweise in den kalten Jahreszeiten an wind- und sonnenschwachen Tagen durchgeführt, um den Einfluss von Wärmestrahlung sowie von Außenwandkonvektion gering zu halten. Die Festlegung der Messstellen erfolgt nach Analyse der Gebäudegeometrie und -technik. Der Materialfeuchtegehalt ist primär von den Innenraumbedingun-

gen, der Lufttemperatur und -feuchtigkeit abhängig. Die Messung des Materialfeuchtegehaltes dient hier dem Abgleich mit zukünftigen Messungen. Somit beschränken sich die Messgrößen für die U-Wert-Messung im Wesentlichen auf Temperaturen (T) an Bauteilen und an der umgebenden Luft sowie auf die Messung der auf den aktuellen Wärmeübergang einwirkenden Parameter. Die Temperaturmessungen sind zeitabhängig vorzunehmen. Die Erfassung der mit Thermoelementen gemessenen Wandtemperaturen erfolgt über ein Zeitintervall, um ggf. den Einfluss der Wärmespeicherung in den Bauteilen zu erkennen bzw. bei der Auswertung weitgehend auszuschließen.

5.8 Aufbau der Versuchswohnung

Für die Auslegung des Feldlabors wurden verschiedene Simulationen mit CFD (Computational Fluid Dynamics) und einem Gebäude Performance Simulationsprogramm IDA ICE durchgeführt. Darauf basierend wurde der Versuchsaufbau erstellt. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt über verschiedene Messungen in der Referenzwohnung. Dazu gehören Messungen zum Energiebedarf, Messungen zur Behaglichkeit, inkl. Temperaturen, und Messungen zur Umsetzbarkeit, wie z.B. die Staubbelastung während der Installation. Zusätzlich erfolgt eine Abschätzung zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Für den Vergleich mit dem Betrieb eines konventionellen Heizkörpers wird in der Feldlaborwohnung ein Referenzraum mit einem Heizkörper ausgestattet. Die Messungen im Raum mit thermisch aktivierter Außenwand werden mit Messungen im konventionell beheizten Raum verglichen.

In dem Referenzraum und in dem Raum mit Außenwandaktivierung werden vergleichende Messungen durchgeführt. Dazu sollen verschiedene Aspekte untersucht werden. Beide Räume werden auf 20 °C gehalten. Im Anschluss wird der Energiebedarf verglichen. Ebenfalls wird die Behaglichkeit in beiden Räumen ermittelt. In weiteren Messungen wird die Raumlufttemperatur in dem Raum mit Heizkörper um 1 bis 2 °C erhöht, da typischerweise kalte Außenwände mit höheren Lufttemperaturen kompensiert werden. Dazu werden die Auswirkungen auf das Behaglichkeitsempfinden und auf den Energiebedarf ermittelt.

Die Vorlauftemperatur der thermischen Außenwandaktivierung ist außenlufttemperaturgeführt und variiert zwischen 30 °C und 40 °C. Die Oberflächentemperaturmessung an der Wand zur Nachbarwohnung soll Aufschluss über Wärmegewinne oder Wärmeverluste geben. Des Weiteren erfolgen Oberflächentemperaturmessungen an der thermisch aktivierten Wand und an der Außenwand im Raum mit Heizkörper ohne Wandaktivierung.

Tabelle 6: Variationen der Sollinnentemperaturen in den beiden Testräumen

	Sollinnentemperatur	
	im Raum mit Außenwandaktivierung in °C	im konventionell beheizten Raum in °C
Vergleich 1	20	20
Vergleich 2	20	21/22

Abbildung 25 zeigt das Schema der technischen Anlage. Der Heizkörper (im Schema nicht zu sehen) ist ebenfalls an der Wohnungsstation am Hochtemperaturanschluss angeschlossen.

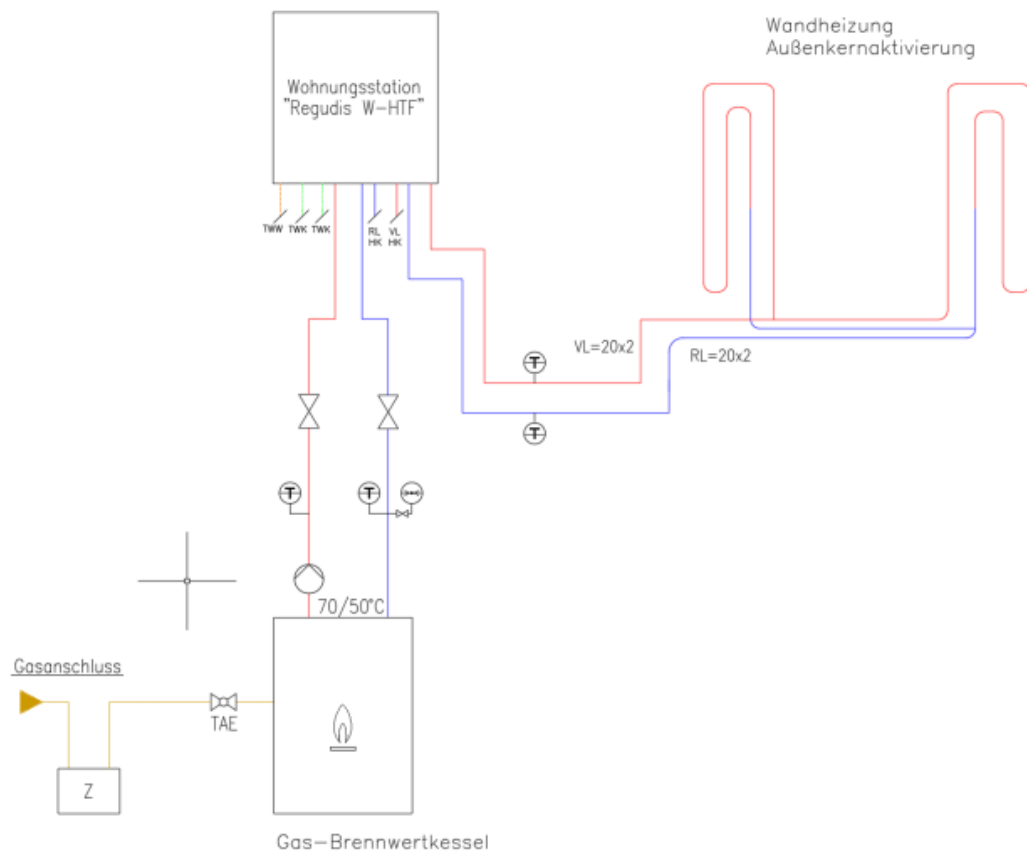


Abbildung 25: Schema technischer Aufbau Versuchswohnung

Das Konzept für die Laborwohnung beinhaltet folgende grundlegende Bestandteile:

- Gas-Brennwertkessel zur Wärmeerzeugung
- Wohnungsstation (Oventrop Regudis „W-HTF“) mit Regelung („Regtronic“)
- Niedertemperaturkreis für die Wandheizung

- Hochtemperaturkreis für den Heizkörper
- Messung der Temperaturen im Vor- und Rücklauf mittels Tauchhülsen
- Messung der Volumenströme mit Volumenstromsensoren

5.8.1 Schlitzarbeiten und Heizungsinstallation

Für die Außenwandaktivierung ist es notwendig die Ziegelwand zu schlitzen. In die Schlitze werden dann die Rohre verlegt, durch welche im Betrieb das Heizwasser fließt, wodurch die Wand temperiert wird.

Bei der Ausführung der Schlitze sind folgende Merkmale relevant:

1. Wie schnell lassen sich die Schlitze ausführen, da die Sanierung auch wirtschaftlich sinnvoll sein muss?
2. Wie viel Staub entsteht beim Schlitzen der Wände und wie kann man diesen minimieren beziehungsweise lokal eingrenzen?

Für die Dauer der Schlitzausführung werden Ausführungsnotizen erstellt, welche mit Zeitstempel versehen werden. Ein Staubmessgerät soll die Staubbelastung der Luft messen. Dafür wurde ein Gerät gewählt, welches den Feinstaubgehalt zweier verschiedener Partikelgrößen in der Luft messen kann. Zum einen PM_{2,5} (Feinstaub) mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 µm und zum anderen PM₁₀ mit einem maximalen Durchmesser von 10 µm. Die Messdaten haben die Einheit µg/m³.

Im Wohnzimmer der Versuchswohnung wurde das Fenster und die rechtsliegende Wandfläche mit einer Staubschutzwand isoliert. Die vom Fenster aus linksliegende Wandfläche liegt nicht in der isolierten Zone. Im Versuch wird die Staubentwicklung mit und ohne Staubschutzwand verglichen. Die Dauer für die Ausführung der Schlitze wird mittels Ausführungsprotokoll ermittelt.

Die Tiefe und die Anordnung der Schlitze wurden vorher mit einem Statiker besprochen. Sie sollen die Tiefe von 60 mm im Mauerwerk nicht überschreiten. Die Länge der horizontal verlaufenden Schlitze soll minimal sein. Die Putzdicke beträgt 10 bis 20 mm. Während der Bauarbeiten lag die Raumlufttemperatur bei 16,5 °C und die relative Luftfeuchtigkeit betrug 56,3 %.



Abbildung 26: Doppelnutfräse mit Staubsauger

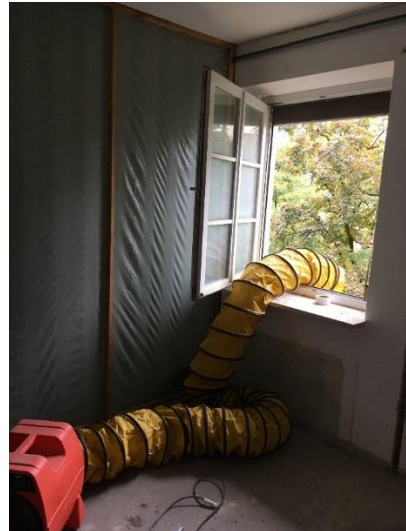


Abbildung 27: Lüftungsgerät mit Abluftschlauch



Abbildung 28: Staubmessgerät (Positioniert im Wohnzimmer außerhalb der Staubschutzwand)



Abbildung 29: Staubschutzwand

Für die Schlitzarbeiten wurden folgende Utensilien benötigt:

- Mauernutfräse / Schlitzfräse (Baier)
- Sauger für Montage an der Fräse
- Abluftgerät für Absaugung aus dem Fenster (oder optional in einen Behälter)
- Staubschutzwand
- Staubmessgerät (PCE-RCM 10)
- Wasserwaage
- Metermaß

Für die Schlitzte wurde die maximale Schlitztiefe vom Gerät ausgenutzt (65 mm). Die Schlitzbreite wurde auf 40 mm eingestellt. Auf ein Entfernen des Putzes wird verzichtet. Um den Mindest-Biegeradius der Rohre zu gewähren, werden in den Eckpunkten diagonale Schlitzte ausgeführt. Die linke Seite vom Fenster wurde zum Vergleich ohne Staub-schutzwand bearbeitet. Das Staubmessgerät wurde dafür im Flur positioniert.

In die erstellten Schlitzte wurden die Heizungsleitungen der Wandaktivierung verlegt. Des Weiteren wurden die statischen Heizkörper, die Zuleitungen zu den Heizkörpern, der Wärmeerzeuger und die Wohnungsstation in der Versuchswohnung installiert.

Bei der Heizungsinstallation sollten folgende Punkte festgestellt und überprüft werden:

- Einbaudauer der Rohre und deren Befestigung in der Außenwand
- Feststellung von Problemen bei der Montage
- Beschleunigung von Arbeitsschritten und Vorgängen

Innerhalb der nächsten zwei Winterperioden soll das praktische Verhalten der Außenwandaktivierung in der Versuchswohnung festgehalten werden. Des Weiteren soll der Vergleich zwischen der Beheizung mit Außenwandaktivierung und einem Heizkörper durchgeführt werden. Der Vergleich soll hauptsächlich den Primärenergieverbrauch und die Behaglichkeit betreffen.

5.8.2 Dauertemperaturmessung

Um Aussagen über die Auswirkungen der Außenwandaktivierung treffen zu können, werden im Wohnzimmer der Feldlaborwohnung Langzeittemperaturmessungen durchgeführt. Die gemessenen Daten sind für die spätere Auswertung relevant, in welcher Temperatur- und Behaglichkeitswerte mit und ohne Außenwandaktivierung miteinander verglichen werden.

Messraster für die Temperaturmessung Referenzwohnung (Wohnzimmer)

- Temperaturmessung im Sommer- und Winterfall
- Messungen in der Horizontalen und Vertikalen
- Randzone von 1 m (nach DIN EN 1264-3)
- Außentemperaturmessung am Fenster und Balkon
- Oberflächentemperaturmessung an der Wand zur Nachbarwohnung (im Winter)
- Bestimmung der Behaglichkeitszonen des Ist-Zustandes

Mit der Außenwandaktivierung soll eine Vergrößerung der Behaglichkeitszone in Richtung der Außenwand erzielt werden und damit die Randzone, in welcher der im Winter

entstehende Kaltluftabfall merkbar ist, verkleinert werden. Daher werden in Außenwandnähe besonders viele Temperaturwerte erfasst. Folgende Abbildung 30 zeigt das verwendete Messraster. Insgesamt wurden 36 Datenlogger im Raum verteilt. Zusätzlich werden an drei Messpunkten auf den Wandoberflächen Temperaturwerte erfasst. Da zum einen die Oberflächentemperatur die operative Raumtemperatur verändert und zum anderen kann mit der Messstelle an der Wand zur anliegenden Wohnung festgestellt werden, ob der Nachbar seine Wohnung heizt oder nicht. Somit können die Messergebnisse besser bewertet werden.

Die Probemessung wurde am 26.06.2019 im Projektbüro durchgeführt. Die Probemessung sollte zeigen, dass die Datenlogger kalibriert sind und etwa die gleichen Temperaturwerte aufnehmen. Die Datenlogger zeigten auf einer Fläche von etwa einem Quadratmeter Abweichungen von bis zu 0,2 K und gelten damit als ausreichend kalibriert. Die Messgeräte wurden am 04.07.2019 in der Laborwohnung im Renatablock in München installiert. Die detaillierte Anordnung der Messstellen geben die nachfolgenden Tabellen und Skizzen.

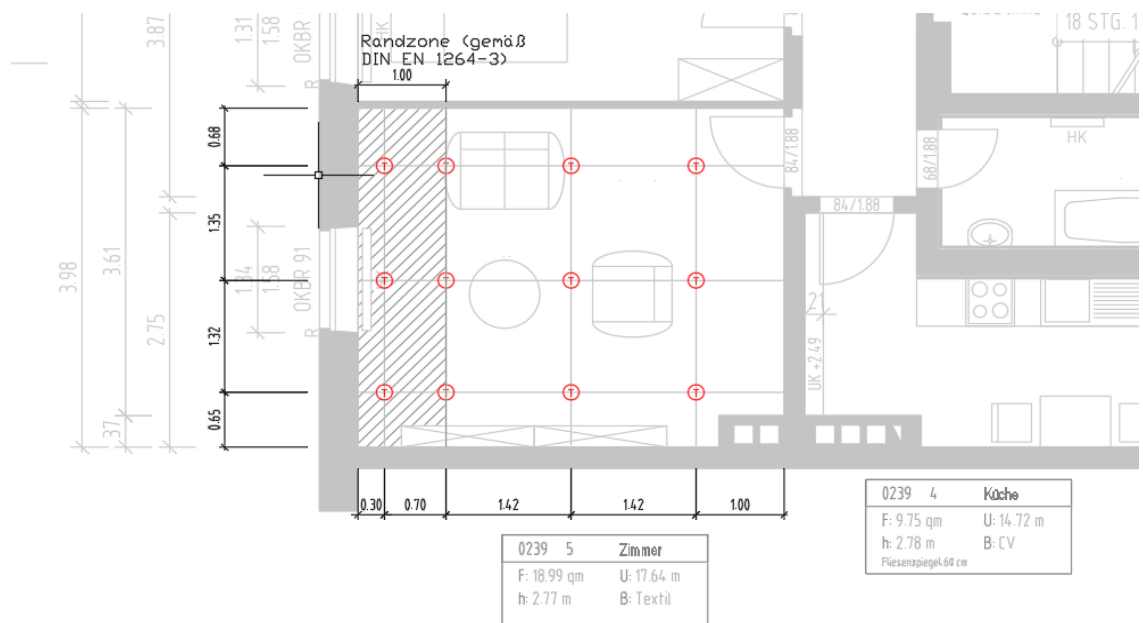


Abbildung 30: Messraster Wohnzimmer Draufsicht

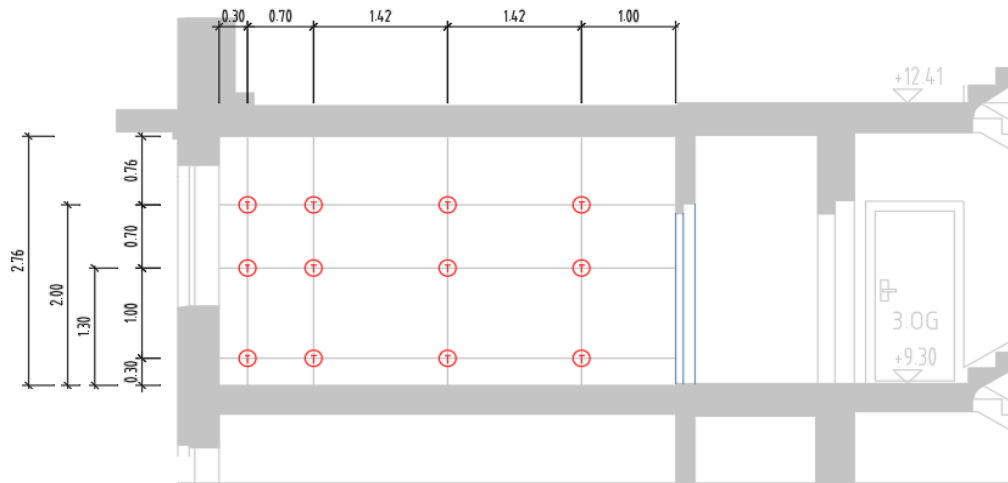


Abbildung 31: Messraster Wohnzimmer Seitenansicht

Tabelle 7: Übersicht der Datenlogger Messraster Wohnzimmer (Schema 1: Heizperiode 2019/20)

Datenlogger	Messgerät Typ	Seriennummer	Ort	Entfernung von Innenseite der Außenwand	Höhe von OKF in m
M01/01	175H1	40327577	Wohnzimmer	0,3	2
M01/02	175H1	175H1	Wohnzimmer	0,3	2
M01/03	175H1	40327604	Wohnzimmer	0,3	2
M01/04	175H1	40367702	Wohnzimmer	1	2
M01/05	175H1	40367685	Wohnzimmer	1	2
M01/06	175H1	40323536	Wohnzimmer	1	2
M01/07	175H1	40323531	Wohnzimmer	2,42	2
M01/08	175H1	40327584	Wohnzimmer	2,42	2
M01/09	175H1	40367728	Wohnzimmer	2,42	2
M01/11	175H1	40367724	Außen Fenster Wohnzimmer		2
M01/12	175H1	40367692	Außen Balkon Küche		0,84
M02/01	175H1	40367712	Wohnzimmer	0,3	1,3
M02/02	175H1	40367696	Wohnzimmer	0,3	1,3
M02/03	175H1	40367701	Wohnzimmer	0,3	1,3
M02/04	175H1	40367704	Wohnzimmer	1	1,3
M02/05	175H1	40367540	Wohnzimmer	1	1,3
M02/06	175H1	überklebt	Wohnzimmer	1	1,3
M02/07	175H1	40367700	Wohnzimmer	2,42	1,3
M02/08	175H1	40323534	Wohnzimmer	2,42	1,3
M02/09	175H1	40367703	Wohnzimmer	2,42	1,3
M02/10	175H1	40323535	Wohnzimmer	3,84	1,3
M02/11	175H1	40367697	Wohnzimmer	3,84	1,3
M02/12	175H1	40327593	Wohnzimmer	3,84	1,3
M03/01	175H1	40367690	Wohnzimmer	0,3	0,3

M03/02	175H1	40327589	Wohnzimmer	0,3	0,3
M03/03	175H1	40367550	Wohnzimmer	0,3	0,3
M03/04	175H1	40327585	Wohnzimmer	1	0,3
M03/05	175H1	40327592	Wohnzimmer	1	0,3
M03/06	175H1	40327582	Wohnzimmer	1	0,3
M03/07	175P1	41000095	Wohnzimmer	2,42	0,3
M03/08			Wohnzimmer	2,42	0,3
M03/09	175H1	40367693	Wohnzimmer	2,42	0,3
M03/10	175P1	40801362	Wohnzimmer	3,84	0,3
M03/11			Wohnzimmer	3,84	0,3
M03/12	175H1	überklebt	Wohnzimmer	3,84	0,3

In der Abbildung 32 ist das installierte Messraster im Versuchszimmer zu sehen. Zur Montage wurden kurzgliedrige Ketten verwendet.



Abbildung 32: Aufbau Raster-Temperaturmessung

Nach Auswertung der ersten Heizperiode 2019/20 wurde das Messraster wie folgt überarbeitet und realisiert (s. Abbildung 33).

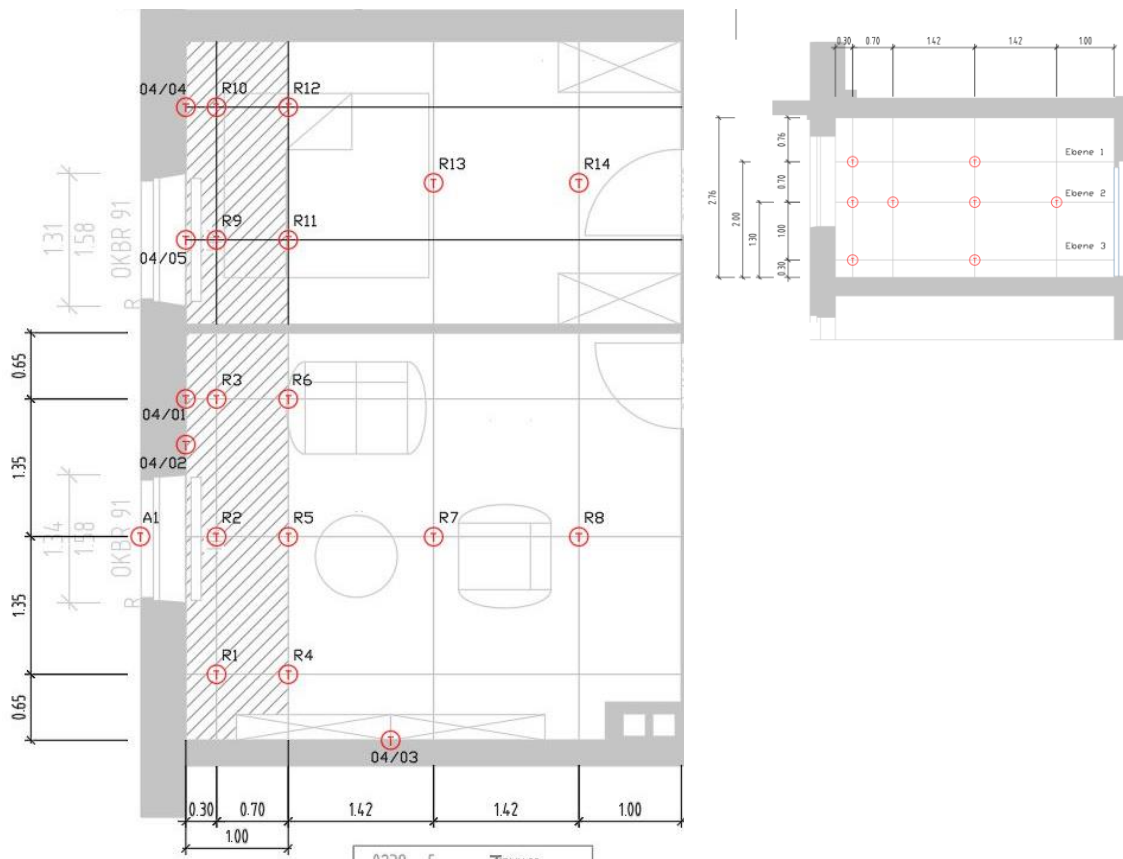


Abbildung 33: Grundriss Messraster Schema 2 (Heizperiode 2020/21), rechts: Schnitt Messraster

Die Messpunkte sind folgendermaßen definiert und an der Wand im Wohnzimmer anhand der Abbildung 34 detaillierter zu erkennen.

Tabelle 8: Wandoberflächentemperaturmessung im Wohnzimmer

Messstellennr.	Position	Messstelle im Gerät
M04/01	Wand rechts vom Fenster mittig	Messstelle 0
M04/02	Wand rechts vom Fenster über Heizleitung	Messstelle 1
M04/03	Wand zur Nachbarwohnung mittig	Messstelle2

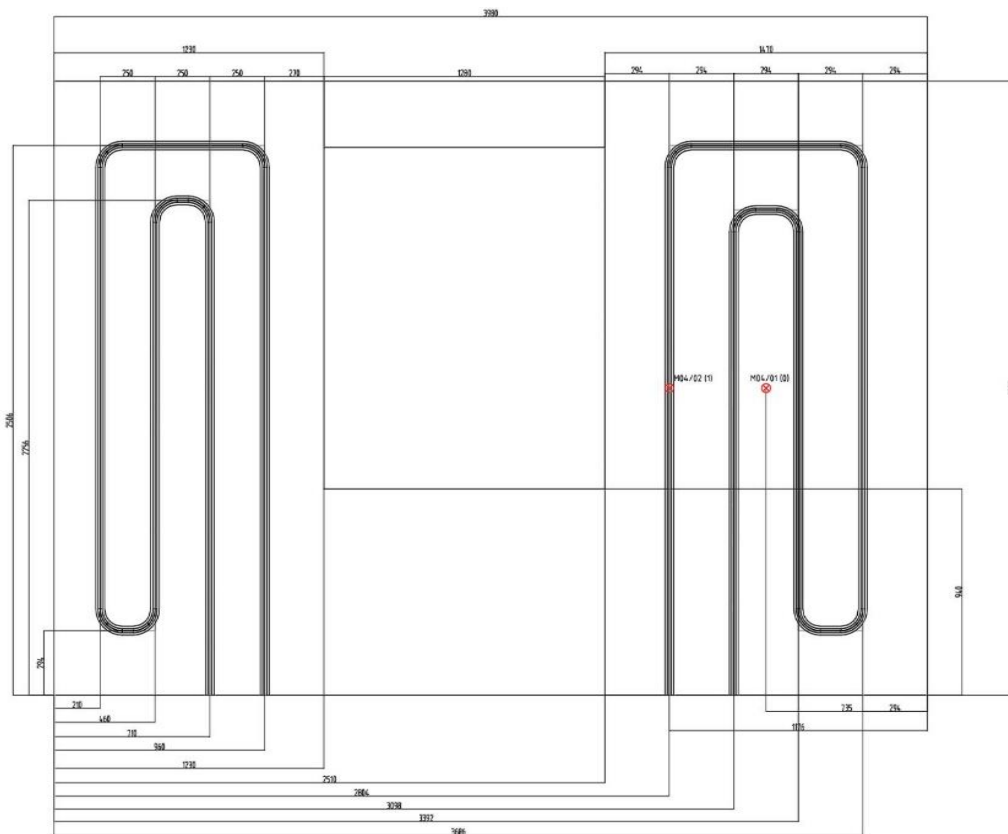


Abbildung 34: Anordnung Oberflächentempersensoren

5.8.3 Messungen zum Energiebedarf und zur Behaglichkeit

Um den Energieverbrauch zu ermitteln, werden Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Volumenstrom gemessen. Die Vor- und Rücklauftemperaturen werden kurz vor Wandeintritt mittels Tauchhülsen und PT1000 Temperatur-Sensoren ermittelt. Im Referenzraum werden die Vor- und Rücklauftemperaturen kurz vor Eintritt in den Heizkörper gemessen. Die Volumenströme werden mittels Volumenstromsensoren (Resol) sowohl im Niedertemperaturkreislauf als auch im Hochtemperaturkreislauf gemessen. Die Sensoren werden im Rücklauf eingebaut. Die Messdaten werden durch die Regelung der Wohnungsstation aufgenommen, was durch einen SD-Karten-Einschub ermöglicht wird.

Um die Behaglichkeit zu beurteilen, sind verschiedene Messungen erforderlich. Die Berechnung der Behaglichkeit erfolgt nach DIN EN 7730. Die benötigten Messgrößen sind hierbei die Lufttemperatur, die gemittelte Strahlungsflächentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, bzw. den Wasserdampfpartialdruck und die Luftgeschwindigkeit. Dazu dient das Messraster der Datenlogger, welche die Lufttemperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit erfassen, Luftgeschwindigkeitssonden und Globe-Sensoren, welche die operative Raumlufttemperatur aufnehmen können.

5.8.4 Thermografie-Aufnahmen

Für die Thermografie-Untersuchung sind in der Heizperiode wöchentlich drei Aufnahmereihen geplant (Montag, Dienstag und Freitag). Je Aufnahmereihe sollen fünf Aufnahmen entstehen, zwei von der Außenfassade (nah und fern), eins von dem Schlafzimmer mit Heizkörper und zwei von dem Zimmer mit Außenwandaktivierung (rechte und linke Wandfläche vom Fenster).

Für die Thermografie-Aufnahmen der Außenfassade werden zwei verschiedene Aufnahmen gemacht. Die erste Aufnahme wird von der gegenüberliegenden Straßenseite gemacht, sodass 3 x 3 Fenster im Bildausschnitt zu sehen sind. Dabei sind die obersten linken beide Fenster die der Referenzwohnung in der 3. Etage unter dem Dachgeschoss. Die Zweite Aufnahme wird von der Straßenseite des Renatablocks gemacht, zu sehen sein sollen 2 x 2 Fenster, wobei die oberen beiden zur Referenzwohnung gehören.



Abbildung 35: Thermografie Außenfassade, Bildausschnitt
3 x 3 Fenster



Abbildung 36: Thermografie Außenfassade, Bildausschnitt
2 x 2 Fenster

Für die Aufnahmen der Außenwand von innen in der Referenzwohnung wurde die Position für die Kamera an der Türöffnung markiert. Die Kamera wird also in die Türöffnung gehalten. Für die Aufnahme der Wandfläche links vom Fenster, wurde die Position auf dem Boden markiert und ebenso ein Kreuz zum Anvisieren an die Wand gezeichnet.



Abbildung 37: Markierung Kameraposition (links: Schlafzimmer, rechts: Wohnzimmer)

Ebenfalls wurde ein Kreuz an die aufzunehmende Wand gemalt, welcher mit dem eingebauten Laser der Kamera anvisiert werden kann.



Abbildung 38: Rotes Kreuz zur Kameraausrichtung

6 Ergebnisse der numerischen und experimentellen Untersuchung

Dieser Abschnitt beinhaltet die numerischen und experimentellen Untersuchungen, welche im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden.

6.1 Bestandsanalyse

Für den Renatablock konnten keine detaillierten Bestandspläne eingesehen werden, dadurch können keine exakten Angaben zum Wärmedurchgangskoeffizient bzw. U-Wert der Bauteile gemacht werden. Der Wärmedurchgangskoeffizient spielt aber eine wichtige Rolle, denn die erzielten Energieeinsparungen erfolgen durch thermisch aktivierte Flächen (Gebäudehülle). Die ersten Annahmen bezüglich der U-Werte erfolgen auf Grundlage des Baujahrs nach DIN EN 12831-1. Zusätzlich wurde noch eine U-Wert Messung vor Ort durchgeführt. Diese wird in den Weiterführenden Kapiteln genauer beschrieben. Die Ermittelten Bauteildaten wurden für die weiteren Berechnungen verwendet.

Es wurde angenommen, dass die Außenwände aus drei Baumaterialien bestehen, nämlich Innenputz, Vollziegel und Außenputz. Die Außenwände der Gebäude weisen jedoch unterschiedliche Dicken auf. Um die Berechnungen zu vereinfachen, wurde ein U-Wert festgelegt, mit dem die Simulationen durchgeführt werden. Die Wandstärken einschließlich Putz betragen im Durchschnitt 42,5 cm. Die Baustoffschichten wurden, wie in Abbildung 39 definiert. Die Annahmen zum Wandaufbau und zu den Materialien ergeben einen U-Wert von 1,379 W/(m²K).

Tabelle 9: Bauteildaten aus Solarcomputer

Baustoffschichten (von innen nach außen)	Dicke, mm	Dichte, kg/m ³	c _p , kJ/kgK	λ _R , W/mK	R, m ² K/W
Leichtputz 1300	15,0	1300,0	1,000	0,560	0,027
Vollziegel, Hochziegel nach DIN 105	420,0	1800,0	0,920	0,810	0,519
Leichtputz 1300	15,0	1300,0	1,000	0,560	0,027

Um die Annahmen zu validieren, wurden zerstörungsfreie Messungen in der Referenzwohnung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der U-Wert der Außenwände zwischen 0,95 W/(m²K) und 2,19 W/(m²K) variiert. Der angenommene U-Wert von 1,379 W/(m²K) liegt somit im Bereich der gemessenen Werte.

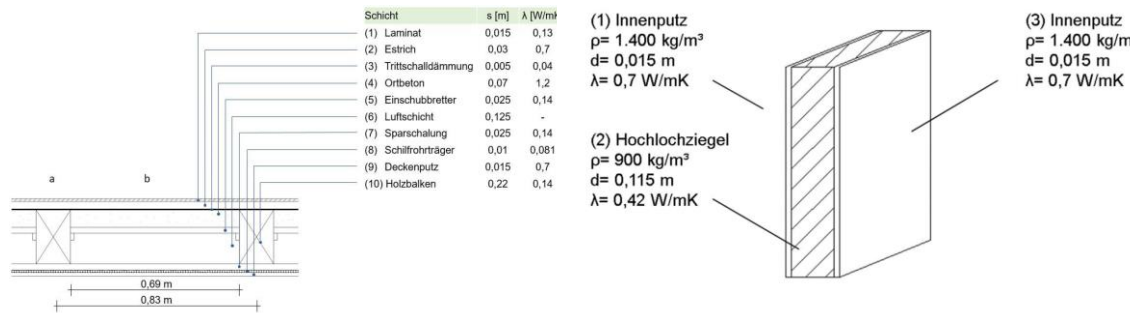


Abbildung 39: Wandaufbau des Untersuchungsobjekts

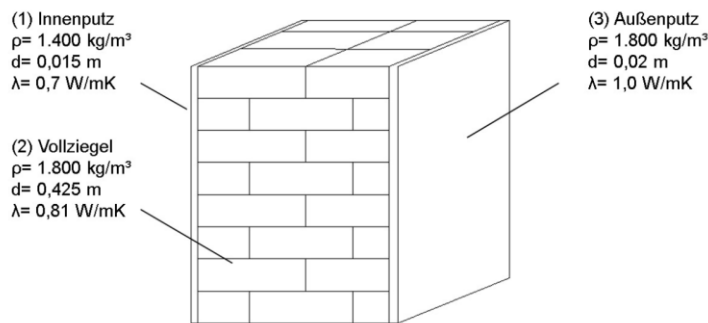


Abbildung 7 - Schichtaufbau AW Ost

$$U_{wz,ow} = \frac{1}{\frac{0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}}{0,7 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,015 \text{ m}}{0,81 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,425 \text{ m}}{1,0 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,02 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}}{0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}} = 1,36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Abbildung 40: Wandaufbau des Untersuchungsobjekts mit dem U-Wert

Die Innenwände weisen unterschiedliche Dicken und Materialien auf. Die Wände waren zum Zeitpunkt der Begehung zum Teil niedergerissen. Bei der Simulation der Referenzwohnung werden die Innenwände detailliert betrachtet, da die Geometrie relativ einfach ist. Es werden die gleichen Annahmen bezüglich des Wandaufbaus wie bei den Außenwänden getroffen.

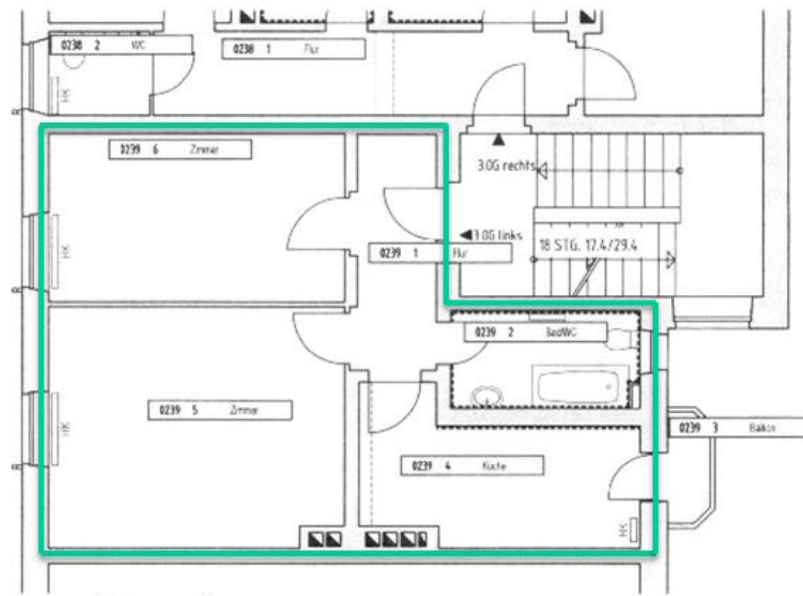


Abbildung 41: Grundriss Versuchswohnung

Um dem Berechnungsaufwand zu minimieren und somit die Berechnungen zu vereinfachen, wird für die ganzen Gebäude ein gemittelter Wert für die Trennwände zwischen Gebäuden festgelegt.

Für eine erste Beurteilung der Umhüllungsflächen wurden Thermografie-Aufnahmen erstellt. Die Abbildung 42 zeigt beispielhaft zwei Aufnahmen des Untersuchungsobjekts vom 27.02.2020. Dabei sind erhöhte Oberflächentemperaturen vor allem in den Brüstungsbereichen unterhalb der Fenster erkennbar.



Abbildung 42: Thermografie-Aufnahme: Ansicht der Fassade des Untersuchungsobjekts

6.2 U-Wert Messung

Die U-Wert-Messung dient der Validierung für die getätigten Annahmen bei den Berechnungen zur Norm-Heizlast und den Simulationen zur Wärmeübertragung. Der wichtigste U-Wert ist der U-Wert der Außenwand. Die bisherige Annahme für den U-Wert der Außenwand ist $1,36 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Messung findet an der Fassade Ost (Wohnzimmer) und West (Küche) statt.

Verwendete Geräte

- a) Klimadatenerfassung: 5 x Datenlogger Testo 175 H1/H2
- b) U-Wert-Messung und Materialfeuchtegehalt:
 - 1 x Handgerät Testo 635
 - 1 x Streufeldsonde (Typ Nr. 0636 6160) zur Messung des Materialfeuchtegehalts
 - 3 x Testo Thermopaare, Glasseide, TE Typ K
 - 1 x Funkhandgriff für Fühler (Typ Nr. 0554 0189)
- c) Laptop zur Messdatenerfassung
- d) IR-Thermographie: 1 x Wärmebildkamera FLIR t420bx
- e) Weitere Hilfsmittel:
 - Thermoklebeband, Aluminium-Klebeband, Wärmeleitpaste
 - Laser-Entfernungsmesser (Leica Disto D510), Zollstock, Notizpapier
 - Ketten, Draht

Die Berechnungen der U-Werte werden anhand einer Excel-Berechnungsdatei ausgeführt. Die Berechnung des U-Wertes erfolgt nach Gleichung 7. Als Ergebnis führt diese Berechnung zu vergleichenden graphischen Darstellungen.

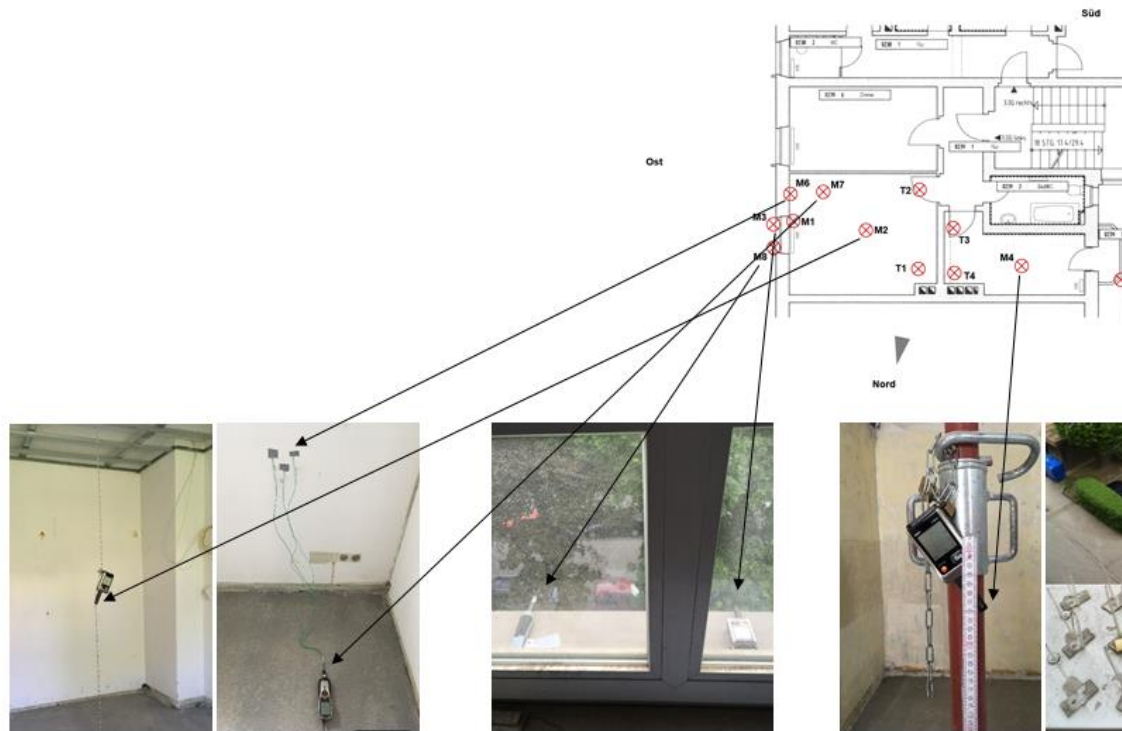


Abbildung 43: Messaufbau U-Wert-Messung

Tabelle 10: Übersicht der Datenlogger

Messstelle	Ort	Messgerät Typ	Messgerät Nr.
M1 innen	Außenwand Wohnzimmer	175 H1	M01
M2 innen	Raummitte Wohnzimmer	175 H1	M02
M3 außen	Außenwand Wohnzimmer	175 H1	M03
M4 innen	Raummitte Küche	175 H1	M04
M19 außen	Brüstung Balkon	175 H1	M19

In der Abbildung 44 ist der Temperaturverlauf der Datenlogger des relevanten Zeitraums zu sehen. Der Unterscheid zwischen den Datenloggern M01 und M02 ist marginal ($\sim 0,1$ °C). Beide Datenlogger befinden sich im gleichen Raum. M01 liegt in Wandnähe (auf dem Fensterbrett) und M02 hängt mittig im Raum auf einer Höhe von 1,34 m. Abbildung 44 zeigt die zeitlich gemittelten Temperaturwerte aller Datenlogger für den Zeitraum 07:43 – 09:53 Uhr (10.05.2019). Datenlogger M04, welcher vor der Ostfassade liegt, zeigt eine höhere Außenlufttemperatur als M19, welcher auf der Westfassade liegt. Die Temperaturdifferenz beträgt mehr als 3 °C.

Tabelle 11: Mittelwerte Temperaturen Datenlogger

	M01	M02	M03	M04	M19
Position	Wohnzimmer, Fensterbrett, innen	Wohnzimmer, mittig, innen	Wohnzimmer, Fensterbrett, außen (Ost)	Küche, mittig, innen	Balkon, außen (West)
Mittelwert Temperatur (Zeitraum 07:43 - 9:53)	18,24 °C	18,34 °C	14,59 °C	17,72 °C	11,70 °C
Mittelwert relative Luftfeuchtigkeit (Zeitraum 07:43 - 9:53)	45,36 %	44,34 %	58,28 %	46,63 %	68,66 %

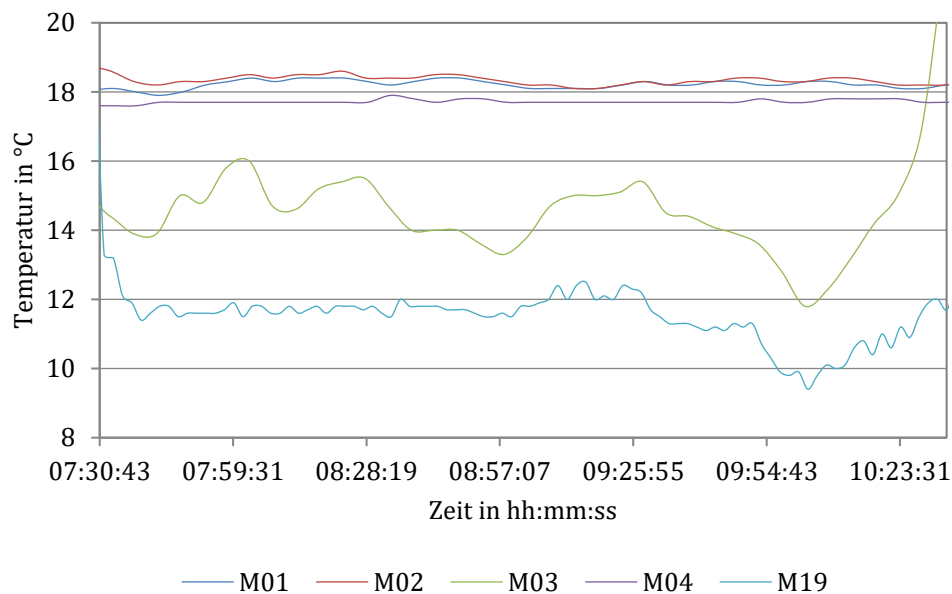


Abbildung 44: Temperaturverlauf der Datenlogger

In der Abbildung 45 ist der relevante Zeitraum der Messung zu sehen. Ab 10:30 wurden noch höhere Außenlufttemperaturen festgestellt, was daran liegen kann, dass Sonnenstrahlen die Temperaturfühler auf dem Fensterbrett getroffen haben. Zusätzlich zu den Temperaturverläufen des Testo 635 Handgeräts sind die Messdaten der für das Wohnzimmer relevanten Datenlogger abgebildet. Es ist zu sehen, dass die Innenraumlufttemperatur konstant bleibt. Der Mittelwert der Innenraumlufttemperatur beträgt 18,3 °C. Sowohl der Temperaturfühler des Testo 635 als auch der Datenlogger M01, der sich in Wandnähe befindet, zeigen einen ähnlichen Verlauf.

Auffällig ist die starke Abweichung bei der Außenlufttemperatur, also die Messwerte des Funkfühlers des Testo 635 und die Messwerte des Datenloggers M03, welche sich beide außerhalb des Gebäudes auf dem Fensterbrett befinden (Ostfassade). Die Differenz beträgt bis zu 2 °C. Eine Testmessung im Inneren ergab in etwa gleiche Temperaturwerte beziehungsweise eine geringe Abweichung von etwa 0,3 °C. Der Funkfühler und der Datenlogger lagen 0,75 m entfernt voneinander. Der intern ermittelte U-Wert des Testo 635

beträgt gemittelt für den Zeitraum 07:43 Uhr bis 9:53 Uhr $1,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. In der Abbildung 45 kennzeichnet die schwarze horizontale Linie den gemittelten U-Wert. Ersetzt man die Temperaturmesswerte des Funkfühlers mit den Werten des Datenloggers M03, so ergibt sich ein gemittelter U-Wert von $1,62 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

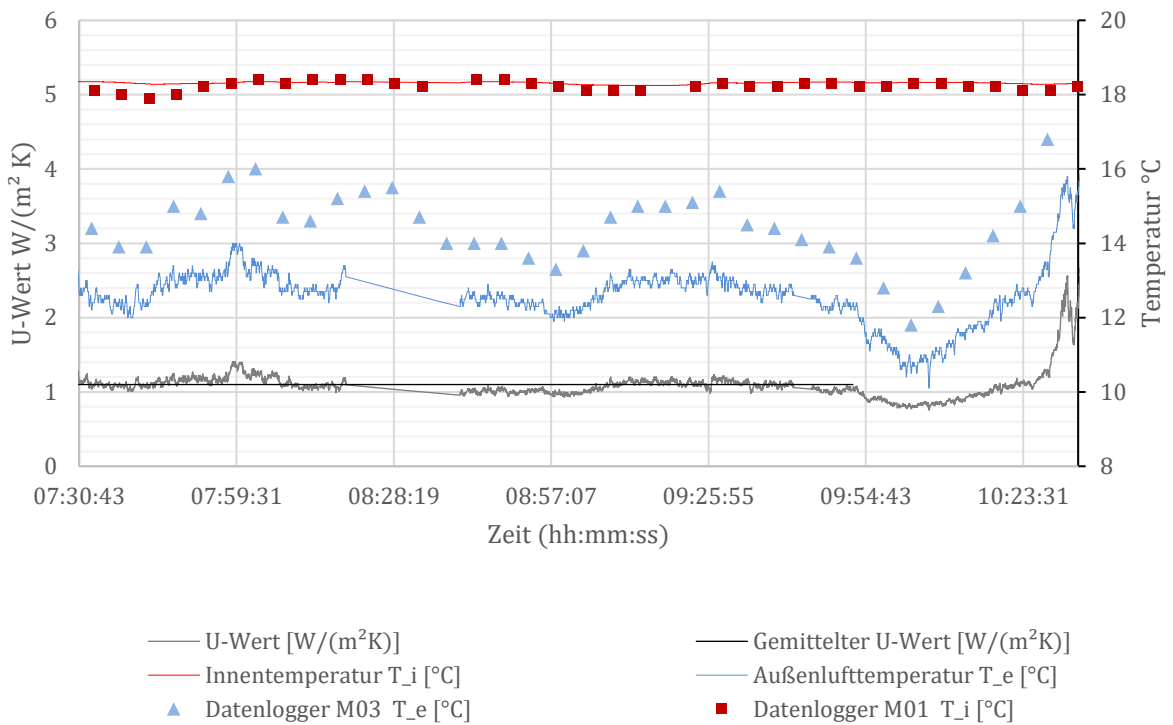


Abbildung 45: Auswertung der Messdaten

Die Tabelle 12 zeigt die zeitlich gemittelten Temperaturwerte der Sensoren des Messgeräts Testo 635 für den Zeitraum 07:43 – 09:53 Uhr (10.05.2019).

Tabelle 12: Mittelwerte Temperaturen Datenlogger

		M6	M7	M8
Position		Wandtemperatur innen Außenwand Ost	Wohnzimmer, innen, 0,7 m vor Außenwand Ost	Wohnzimmer, Fensterbrett, außen (Ost)
Mittelwert	Temperatur	17,52 °C	18,31 °C	12,77 °C
	(Zeitraum 07:43 - 9:53)			

Die Auswertung führt zu den folgenden Ergebnissen:

- (1) Die bauphysikalische Vorbetrachtung der Außenwand und die Annahmen zum Wandaufbau und zu Materialien ergab einen U-Wert von $1,36 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

- (2) U-Wert-Messungen aus der thermischen Methode ergeben tendenziell zu geringe U-Werte. Ursache hierfür ist die in wärmeren Perioden wirksam werdende hohe Speicherkapazität mineralischer Baustoffe.

Die Aufnahmen der Wärmebildkamera dienen der Analyse der Temperaturen der raumschließenden Oberflächen. Die Wärmebildaufnahmen geben zudem Aufschluss über Wärmebrücken. Anhand der Bestimmung der Oberflächentemperaturen können mit den gemessenen Außen- und Innenlufttemperaturen U-Werte ermittelt werden. Somit stellt die Thermographie eine Gegenkontrolle der U-Wert-Messung des Testo 635 dar.

Die Auswertung der Thermographie-Aufnahmen erlaubt so eine Bildung von repräsentativen Mittelwerten für die Wandtemperatur sowie eine punktgenaue Wahl der Messstellen für die thermische U-Wert-Messung. Abbildung 46 zeigt eine Thermografie-Aufnahme an der Messstelle T2 (Eingang Wohnzimmer). Es wird ein Emissionsgrad von 0,95 angenommen. Man sieht ein Rechteck für eine flächengemittelte Oberflächentemperatur. Die durchschnittliche Temperatur beträgt 17,5 °C. Legt man die gemessenen Lufttemperaturen der Datenlogger M01 und M03 zu Grunde (vgl. Tabelle 13) ergibt das einen U-Wert von 1,56 W/(m²K). Abbildung 47 zeigt einen anderen Bereich der Außenwand. Die Flächenmittelung nahe der Innenwand ergibt eine Durchschnittstemperatur von 17,2 °C (2,19 W/(m²K)) und die Fläche unterhalb des Fensters 17,4 °C (1,77 W/(m²K)). Nimmt man für die Außenlufttemperatur die Werte des Funkfühlers des Testo 635 an, ergeben sich für die Oberflächentemperaturen folgende U-Werte.

Tabelle 13: Vergleich ermittelter U-Werte bei angenommenen Lufttemperaturwerten von Datenlogger und Testo 635

Wandtemperatur	U-Wert (mit Datenlogger)	U-Wert (mit Testo 635)
17,5 °C	1,56 W/(m ² K)	1,12 W/(m ² K)
17,4 °C	1,77 W/(m ² K)	1,26 W/(m ² K)
17,2 °C	2,19 W/(m ² K)	1,54 W/(m ² K)

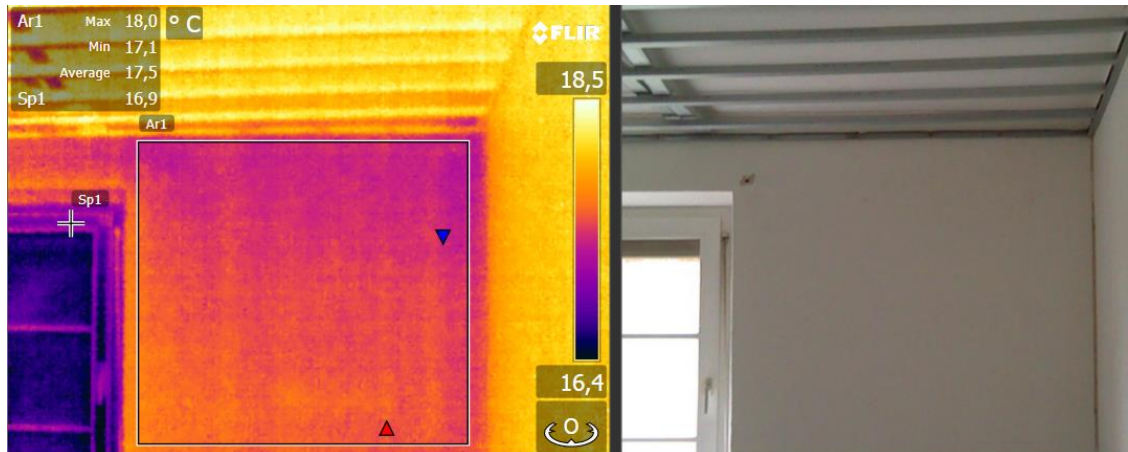


Abbildung 46: Thermografie Messstelle T2 Außenwand Ost/ Wohnzimmer, Zeitpunkt: 10.05.2019 um 07:42 Uhr

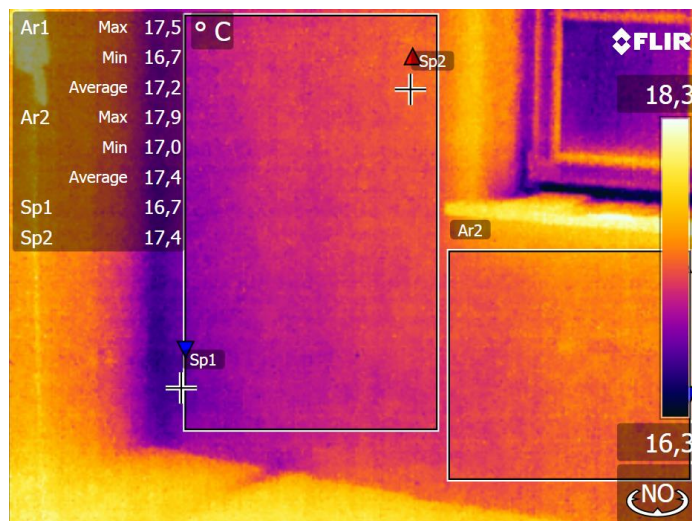


Abbildung 47: Thermografie Messstelle T2 Außenwand Ost/ Wohnzimmer, Zeitpunkt 10.05.2019 um 09:28 Uhr

Für die nach Westen ausgerichtete Außenwand in der Küche lassen sich ebenfalls U-Werte mittels der Thermografie-Messung und der Temperaturmessung über die Datenlogger M04 (Küche, innen) und M19 (Brüstung des Balkons, außen). Abbildungen 48 und 49 zeigen Thermografie-Aufnahmen mit flächengemittelten Temperaturwerten. Die flächengemittelten Temperaturwerte betragen 16,7 bis 17,0 °C.



Abbildung 48: Thermografie Messstelle T4 Außenwand West/ Küche, Zeitpunkt 10.05.2019 um 09:29 Uhr

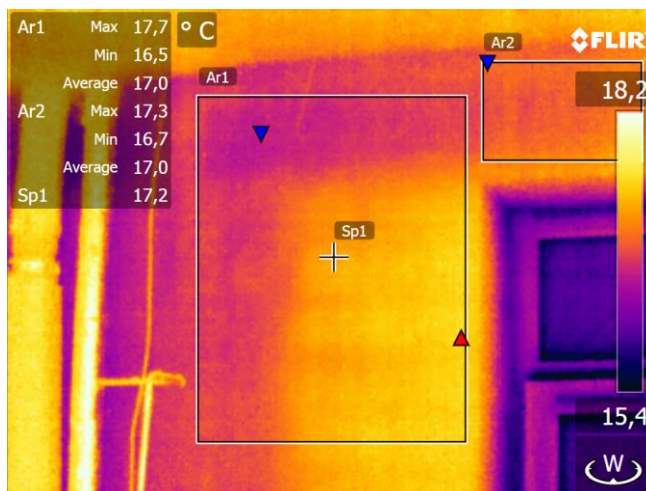


Abbildung 49: Thermografie Messstelle T4 Außenwand West/ Küche, Zeitpunkt 10.05.2019 um 09:29 Uhr

Tabelle 14 zeigt die ermittelten U-Werte der entsprechenden Temperaturwerte. Der gemessene U-Wert beträgt demnach 0,95 bis 1,35 W/(m²K).

Tabelle 14: Ermittelte U-Werte verschiedener Oberflächentemperaturen Außenwand West (Küche)

Wandtemperatur	Lufttemperatur innen (M04)	Lufttemperatur außen (M19)	U-Wert
16,7 °C	17,72 °C	11,70 °C	1,35 W/(m ² K)
16,8 °C	17,72 °C	11,70 °C	1,22 W/(m ² K)
17,0 °C	17,72 °C	11,70 °C	0,95 W/(m ² K)

Die Feuchtegehaltsmessungen an Bauteilen werden nach der kapazitiven Messmethode begleitend zu den U-Wert-Messungen an ausgewählten Bauteilen durchgeführt. Dabei werden Stichproben entnommen. Die Basis für Abweichungen liefern die Richtwerte in Norm DIN 4108-4. Bauteile im Bereich geringer Luftbewegung neigen sehr stark zur Aufnahme von Feuchtigkeit. Da die Referenzwohnung schon seit einigen Monaten ohne Heizkörper leer steht, steigt der Materialfeuchtegehalt der Außenwand lokal auf über 30%. Abbildung 50 zeigt im linken Bild den Materialfeuchtegehalt der nach Osten ausgerichteten Außenwand über der Messstelle M6 und im rechten Bild links neben der Balkontür der Küche an der nach Westen ausgerichteten Außenwand



Abbildung 50: Links: Materialfeuchtegehalt Außenwand Ost/ Wohnzimmer; rechts: Materialfeuchtegehalt Außenwand West/ Küche

Für eine zuverlässigere U-Wert-Messung sollte ein stationärer Zustand erreicht sein. Hierfür eignen sich die Nachtstunden (3 bis 4 Uhr). Zur Zeit der Messung vom 10.05.2019 (ab 07:00) ist die Sonne schon aufgegangen und erwärmt die Außenluft, was für einen stationären Zustand nicht förderlich ist. Da die Außenwand ein träges System darstellt, kann dies die Messwerte verfälschen. U-Wert-Messungen müssen über einen längeren Zeitraum erfolgen (mindestens 24 - 72 h). ISO 9869 fordert ein treibendes Gesamt-Temperaturgefälle von 20 K über eine Messdauer von 72 h, um den stationären Wärmeübergang darzustellen.

Die starke Abhängigkeit der U-Wert-Bestimmung von der Außenlufttemperatur zeigt Abbildung 44. Der Verlauf des ermittelten U-Wertes gleicht den Schwankungen der Außenlufttemperatur. Die U-Wert-Messung sollte außerdem in einer kälteren Jahreszeit durchgeführt werden, damit ein möglichst hoher Temperaturgradient zwischen Innen- und Außenluft entsteht. Durch nicht vorhandene Heizmöglichkeiten konnte der Temperaturgradient nicht erhöht werden. Die Außentemperatur betrug um 7 Uhr 12 °C und stieg im Verlauf der Messungen noch weiter. Auf Grund der thermischen Trägheit der Außenwand, ist der U-Wert stark abhängig von den Außenlufttemperaturen. Ein plötzlicher Abfall der Außenlufttemperatur bewirkt eine drastische U-Wert-Verbesserung, bzw. einen kleineren Wert. Bei der Erfassung der Außenlufttemperatur ist die große Differenz zwischen dem Datenlogger M03 und dem Funküberträger des Testo 635-Geräts auffällig. Die Genauigkeit der Thermografie hängt von vielen Parametern ab. So kann der Abstand zum aufzunehmenden Objekt, der geschätzte Emissionsgrad und die Annahme zur reflektierten Temperatur die Ergebnisse relativ stark beeinflussen. Durch die inhomogenen Temperaturwerte lässt sich kein konstanter U-Wert für die Außenwand ermitteln. Fasst man alle Messungen zusammen, so variiert der U-Wert für die Außenwand in einem Bereich zwischen 0,95 und 2,19 W/(m²K). Der nach den bauphysikalischen Gutachten bestimmte nach DIN EN ISO 6946 berechnete U-Wert für die Außenwand von 1,36 W/(m²K) liegt im Bereich der gemessenen Werte. Im vorliegenden Fall ergibt die thermische U-Wert-Bestimmung (T-Messung und Berechnung nach Norm) nur für gedämmte Bauteile und nur im Fall von treibenden Temperaturgefällen $\Delta T > 15\text{K}$ verwertbare Ergebnisse.

6.3 Wetterdatenanalyse

Für die Definition verschiedener Heizszenarien wurde eine meteorologische Analyse durchgeführt. Dafür wurden die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Diese Testreferenzjahre sollen für eine bestimmte Klimaregion den typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Die Datensätze sind vor allem für Simulationen und Berechnungen im heizungs- und raumluftechnischen Bereich geeignet. Das Testreferenzjahr 2015 (TRY 2015) repräsentiert den Zeitraum von 1995 bis 2012 und das prognostizierte Testreferenzjahr 2045 (TRY 2045) kann für den Zeitraum 2031 bis 2060 verwendet werden. Je nach Koordinaten werden verschiedene Datensätze generiert. Für das Forschungsvorhaben wurden die Koordinaten für den Renatablock in München ausgewählt. Die folgende Abbildung 51 zeigt die Jahresdauerlinie der beiden Testreferenzjahre. Die Kurve des TRY 2045 ist nach oben verschoben (s. Abbildung 51).

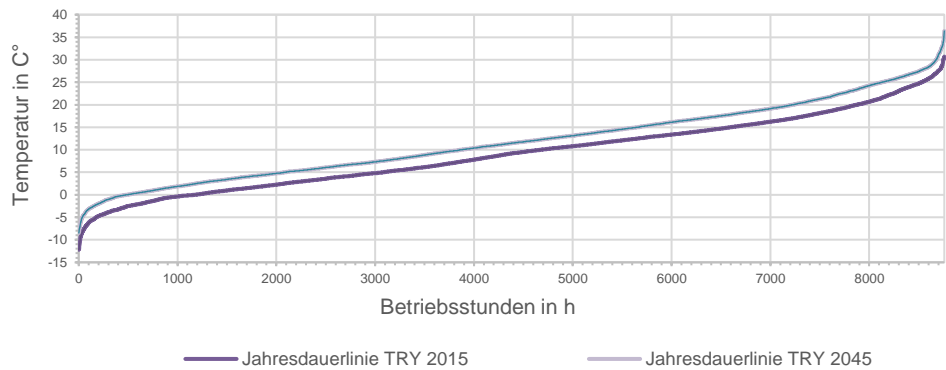


Abbildung 51: Jahresdauerlinie der Testreferenzjahre, Standort München

Auch bei dem Verlauf der tagesgemittelten Außenlufttemperatur der beiden Testreferenzjahre ist ein eindeutiger Temperaturanstieg zu sehen (s. Abbildung 52).

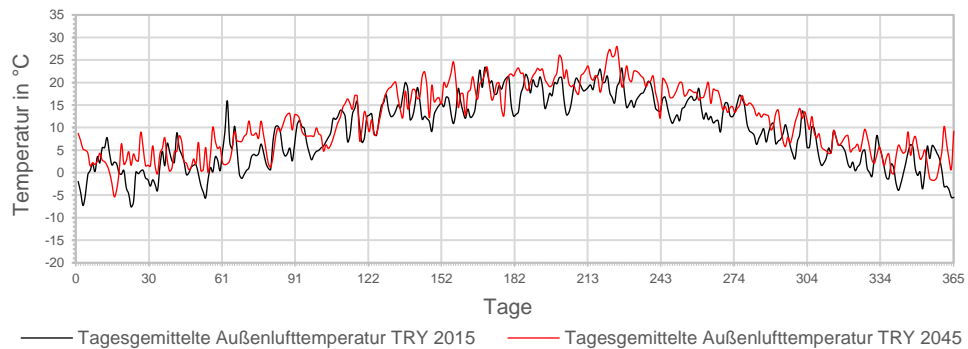


Abbildung 52: Tagesgemittelte Außenlufttemperatur der beiden Testreferenzjahre, Standort München

Die folgende Tabelle 15 zeigt die statistische Auswertung der Temperaturwerte. Die Jahresdurchschnittstemperatur für den Zeitraum von 2031 bis 2060 (TRY2045) steigt um $2,6^{\circ}\text{C}$ nach oben. Im TRY 2045 fallen die Temperaturen nur während 36 Stunden des Jahres unter -5°C . Das hat zur Folge, dass die aktuellen Heizungen überdimensioniert sind. Der klimatische Wandel lässt also eine Leistungsminderung des Heizsystems zu. Außerdem müssen viele Wärmeverteilsysteme im Bestand für den Einsatz von regenerativen Energien angepasst werden. Des Weiteren werden Kühltechniken relevanter, da die Anzahl an Stunden, in denen die Temperatur auf über 30°C steigt, auf 81 Stunden ansteigt (gemittelter Wert für Zeitraum 2031 bis 2060).

Tabelle 15: Übersicht der Wetterdatenanalyse (Prof. K. Biek, EffTecSo-modIn)

	TRY 2015			TRY 2045		
Jahresdurchschnittstemperatur	9,2			11,8		
Maximale Temperatur, °C	30,7			36,4		
Minimale Temperatur, °C	-12,2			-8,5		
Anzahl der Heiztage	270			224		
Stündlich gemittelte Lufttemperatur	Stunden	Tage	Bezogen auf ein Jahr in %	Stunden	Tage	Bezogen auf ein Jahr in %
Unter 15 °C	6578	274	75,1	5637	235	64,3
Unter 5 °C	3066	128	35,0	2071	86	23,6
Unter 0 °C	1156	48	13,2	471	20	5,4
Unter -5 °C	174	7	2,0	36	2	0,4
Über 12 °C	3271	136	37,3	4151	173	47,4
Über 15 °C	2149	90	24,5	3088	129	35,3
Über 30 °C	8	0	0,1	81	3	0,9

6.4 Numerische Simulationen

Für die Betrachtung eines einzelnen Raumes wird ein Ausschnitt der Außenwand modelliert, welcher den Versuchsraum begrenzt, und der Wärmedurchgang wird mittels CFD-Untersuchungen modelliert. Die Simulation der Energieflüsse für das gesamte Wohnquartier passiert mittels IDA ICE.

6.4.1 CFD-Untersuchung

Für die Auslegung und den Aufbau der Versuchswohnung wurden verschiedene numerische Simulationen durchgeführt. Die Modellierung der Leitungsführung und Einbaudetails durchlief mehrere Iterationen. Sie unterlag mehrerer Parameter, wie die Einhaltung statischer Bestimmungen, da das tragende Mauerwerk geschlitzt wird, sowie energetischer Anforderungen, welche einen möglichst kleinen Energiefluss an die Außenluft und einen möglichst hohen an die Raumluft implizierten.

Für die luftberührenden Flächen werden Wärmeübergangskoeffizienten und die angrenzende Lufttemperatur angenommen. Nach DIN EN 12831-1 kann für den Wärmeübergangskoeffizienten für vertikale innenliegende Flächen $7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und für den Wärmeübergangskoeffizienten für außenluftberührende Flächen $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen werden. Für die Bewertung der Energieflüsse in der Wand werden im Gegensatz zur Norm-Heizlastberechnung die Bilanzgrenzen um die Außenwand gelegt.

Bei der Norm-Heizlastberechnung stellt die Außenwand ein passives Bauteil dar, welches einen gewissen Wärmeleitwiderstand bzw. Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) hat. Durch die Sollinnentemperatur und die Normaußentemperatur für Heizlastauslegung lassen sich die Transmissionswärmeverluste ermitteln. Die zusätzliche Ermittlung der Lüftungswärmeverluste ergibt dann die in dem Raum zu installierende Heizleistung. Für die Simulation der thermischen Bauteilaktivierung werden ebenfalls die Sollinnentemperatur

und Außenlufttemperatur angenommen. Anschließend wird der Wärmestrom an den Bilanzgrenzen der Außenwand betrachtet. Die Wärmeströme an der raumseitigen Bilanzgrenze zeigen dann, ob der Transmissionswärmeverlust durch die Bauteilaktivierung gedeckt werden kann. Hat der Wärmestrom ein positives Vorzeichen, so werden die Transmissionswärmeverluste gedeckt und der Wärmestrom in den Raum wird genutzt, um die Lüftungswärmeverluste auszugleichen. Bei einem negativen Wert reicht die Bauteilaktivierung nicht aus, um die Transmissionswärmeverluste auszugleichen. Zusätzlich zum Lüftungswärmeverlust würde also der Betrag des Transmissionswärmeverlustes an Heizleistung fehlen.

Durch die numerischen CFD-Untersuchungen lassen sich also Aussagen über den Wärmestrom nach innen, den Wärmestrom nach außen und die Oberflächentemperaturen (relevant für Behaglichkeit) treffen.

Eine Voruntersuchung ohne Fenster sollte zeigen, wie sinnvoll eine Dämmung hinter den Rohren ist. Bei 10 mm Dämmung (Annahme: $\lambda_{\text{Dämmung}} = 0,027 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) wird der Wärmestrom nach außen um ca. 6 % reduziert.

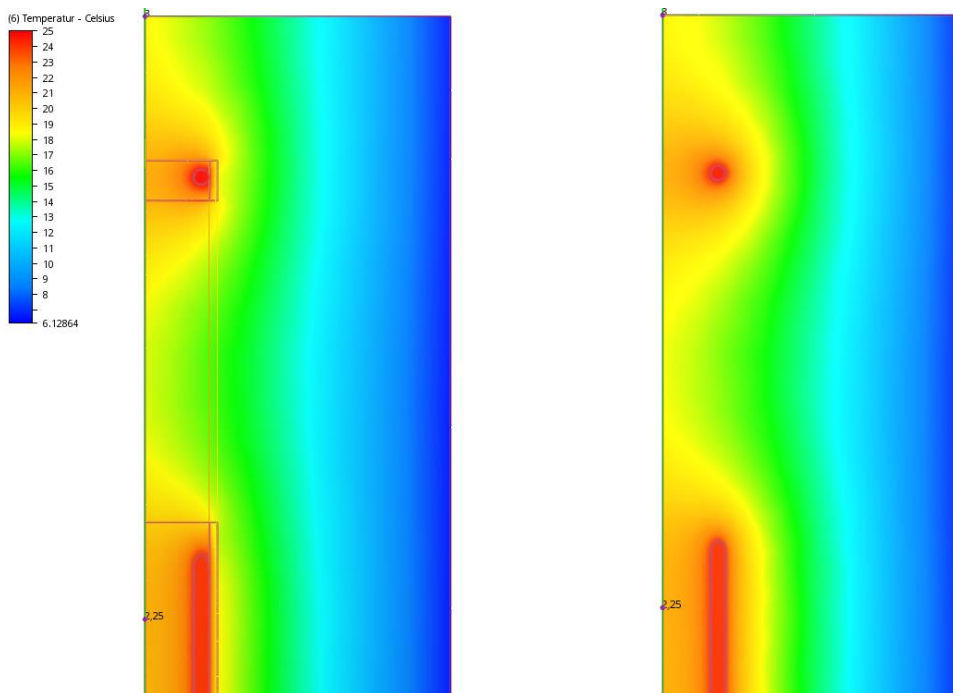


Abbildung 53: Voruntersuchung, links mit Dämmung hinter den Rohren, rechts ohne Dämmung

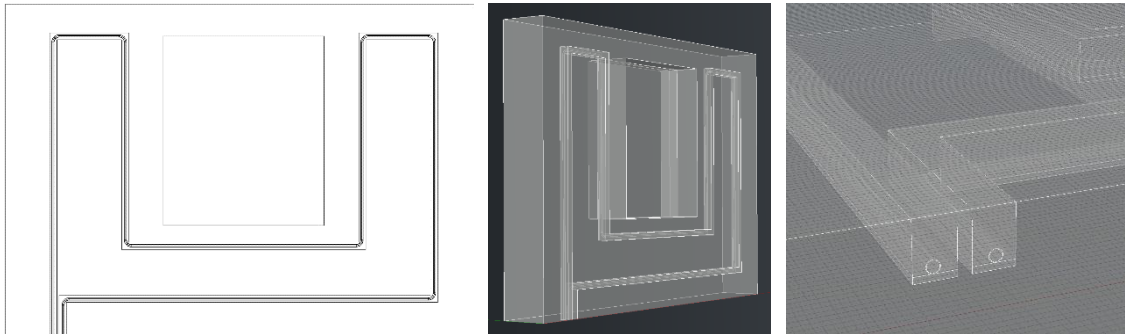


Abbildung 54: Erste Modelle der Leitungsintegration für die Außenwandaktivierung

Für den exakten Aufbau und die exakten Dimensionen der Wandaktivierung wurde für eine geringere Berechnungszeit ein Modell für einen Wandausschnitt (Abmessungen Grundfläche: 264 x 264 mm, Dicke Wandaufbau gesamt 460 mm) erstellt (s. Abbildung 55).

	<p><u>Parametervariationen:</u></p> <p><u>Rohrmaterial:</u> Kupfer, Aluverbundrohr, PE-RT, PE-X (20 x 2 mm, 16 x 2 mm)</p> <p><u>Dämmung:</u> Styropor, Styrodur, Armaflex (10 mm)</p> <p><u>Überdeckung:</u> Beton, Zement-Estrich</p> <p><u>Vorlauftemperatur:</u> 35 °C, 30 °C, 27 °C, 25 °C</p> <p><u>Fließgeschwindigkeit:</u> 0,4 m/s; 0,2 m/s; 0,1 m/s</p> <p><u>U-Werte:</u></p> <p><u>Außenwand:</u> 1,36 W/(m²*K)</p> <p><u>Fenster (alte Fenster):</u> 3 W/(m²*K)</p> <p><u>Fenster (neue Fenster):</u> 1,3 W/(m²*K)</p>
--	--

Abbildung 55: Wandausschnitt für CFD-Untersuchung mit Parametervariationen

Für das Mauerwerk wurde der angenommene U-Wert übertragen, welcher mittels der U-Wert Messung überprüft wurde. Die Parametervariationen für die Simulationen wurden aufgrund der im Kapitel 4.7 beschriebenen Eigenschaften von Materialien für die Wandaktivierung ausgewählt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Kupfer durch die hohe Wärmeleitkennzahl, die größte Leistung erzielt. Projektinterne Entscheidungen haben Kupferleitungen jedoch ausgeschlossen, da auf Verbindungen in der Wand, welche nach vielen Jahren zu Undichtigkeiten führen können, verzichtet werden soll. Die Wahl fiel auf Kunststoff-Rohre oder Verbundrohre. Durch ein Sponsoring der Firma Rehau wurden die Kunststoff-Rohre mit dem Firmennamen „Rautherm S“ verbaut. Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der Parametervariation. Die letzte Spalte gibt den Wärmestrom an, der ohne die Bauteilaktivierung durch die Außenwand fließen würde (Null-Wärmestrom). Interessant bei den Untersuchungen war zum einen der in Richtung der Raumluft fließende Wärmestrom (Spalte „Wärmestrom nach innen“) und das Verhältnis zu dem in Richtung der Außenluft fließende Wärmestrom (Spalte „Wärmestrom nach außen“). Dabei ist zu bedenken, dass der Wärmestrom ohne thermische Aktivierung („Null-Wärmestrom“) berücksichtigt wird. Also der Wärmestrom, der durch den Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenluft entsteht. Dieser Wärmestrom muss die Bauteilaktivierung überwinden, um zusätzlich Wärme in den Raum abzugeben. Bei der Parametervariation der hinter dem Rohr liegenden Dämmung zeigt sich für die Variante ohne Dämmung das schlechteste Verhältnis zwischen dem nach innen gerichteten und dem nach außen gerichteten Wärmestrom. Das beste Verhältnis zeigt die ideale Dämmung mit einem Wärmeleitkoeffizienten von 0 W/mK, der Unterschied zu einer Schicht Styrodur oder Armaflex ist jedoch gering. Im Vorhaben wurde sich für die Variante mit Armaflex entschieden.

Die Vorlauftemperaturen beeinflussen maßgeblich den Wärmestrom, jedoch erhöht man damit auch den Wärmestrom an die Außenluft. Das Verhältnis der Wärmeströme in beide Richtungen verändert sich nur geringfügig. Je geringer die Vorlauftemperatur, umso günstiger ist das Verhältnis.

Für die Leitungsführung wurde die Außenwand modelliert. Für die Gewährleistung der tragenden Eigenschaft der Außenwand, wurde mit dem Statiker abgesprochen, nur minimale Strecken horizontal zu schlitzten. Des Weiteren sollte eine Schlitztiefe von 60 mm im Mauerwerk nicht überschritten werden. Bei 20 mm Putz wäre das eine Gesamtschlitztiefe von 80 mm. Diese Tiefe wurde für das Modell angenommen. Bei den tatsächlichen Schlitzarbeiten hat sich eine Gesamtschlitztiefe von 65 mm ergeben, da auf das Entfernen des Putzes verzichtet wurde (siehe Abschnitt Schlitzte).

Tabelle 16: Parametervariation

Rohraußendurchmesser	Rohrdicke	Rohrmaterial	Überdeckung	Dämmung hinter Rohr	Temperatur innen	Temperatur außen	Geschwindigkeit Wasser	Temperatur Wasser	Wärmestrom nach innen	Wärmestrom nach außen	Verhältnis Wärmestrom nach innen/ Wärmestrom nach außen	Verhältnis Wärmestrom nach innen(Differenz-Null-Wärmestrom)/ Differenz(Wärmestrom nach außen- Null-Wärmestrom)	Wärmestrom ohne TABS			
mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)	°C	°C	m/s	°C	gesamt	Fläche 8						
									0,07	0,07						
16	2	Kupfer	380	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,62	-2,46	0,66	2,90	-1,41
16	2	PE-RT	0,4	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,24	-2,34	0,53	2,87	-1,41
16	2	PE-XC	0,35	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,20	-2,32	0,51	2,87	-1,41
16	2	Aluverbundrohr	0,43	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,26	-2,34	0,54	2,89	-1,41
16	2	Aluverbundrohr	0,43	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,26	-2,34	0,54	2,89	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,48	-2,43	0,61	2,84	-1,41
25	3,7	RAUTITAN stabil	0,43	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,46	-2,49	0,58	2,66	-1,41
25	2,3	RAUTHERM S	0,35	Beton	1,1	Polystyrol	0,027	20	5	0,2	30	-1,60	-2,53	0,63	2,69	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Beton	1,1	Styrodur	0,038	20	5	0,2	30	-1,48	-2,44	0,61	2,81	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Beton	1,1	Armaflex	0,033	20	5	0,2	30	-1,48	-2,44	0,60	2,81	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Beton	1,1	Ideale Dämmung	0	20	5	0,2	30	-1,45	-2,42	0,60	2,84	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Beton	1,1	keine Dämmung	0	20	5	0,2	30	-1,63	-2,84	0,57	2,14	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Estrich Zement	1,4	Armaflex	0,033	20	5	0,2	30	-1,60	-2,46	0,65	2,87	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Estrich Zement	1,4	Armaflex	0,033	20	5	0,4	30	-1,62	-2,47	0,65	2,87	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Estrich Zement	1,4	Armaflex	0,033	20	5	0,2	50	-5,93	-3,97	1,49	2,88	
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Estrich Zement	1,4	Armaflex	0,033	20	5	0,2	30	-1,60	-2,46	0,65	2,87	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Estrich Zement	1,4	Armaflex	0,033	20	5	0,2	35	-2,67	-2,83	0,94	2,87	-1,41
20	2	Aluverbundrohr	0,43	Estrich Zement	1,4	Armaflex	0,033	20	5	0,2	27	-0,95	-2,24	0,42	2,85	-1,41
25	3,7	RAUTITAN stabil	0,43	Estrich Zement	1,4	Armaflex	0,033	20	5	0,2	30	-1,56	-2,51	0,62	2,70	-1,41

Die tatsächliche Ausführung der Außenwandaktivierung wurde anschließend ebenfalls für numerische Simulationen und eine spätere Validierung dieser mittels Messungen modelliert. Die Abbildung 56 zeigt einen Ausschnitt verschiedener Variationen, welcher einem Statiker vorgelegt wurden.

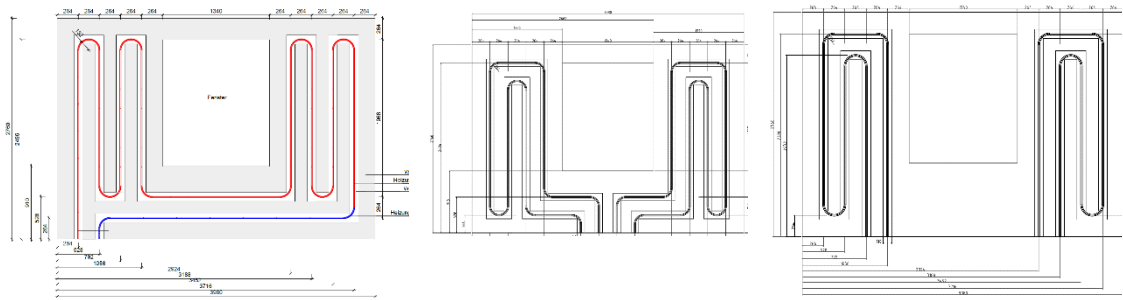


Abbildung 56: Variationen der Leitungsführung

Untersuchungen des Statikers, welche eine Wandstärke von ca. 41 cm inklusive Putz (Putzstärke ist innen und außen mit $\geq 2\text{cm}$ anzusetzen) bestätigen, so dass von einer Stärke der Ziegelschicht von 36,5 cm ausgegangen wurde, ergaben eine realisierbare Schlitztiefe in den Ziegel von 6 cm. Je nach Putz läge dann die Tiefe bei 8cm oder größer. Die horizontalen und schrägen Schlitzte sind problematisch wegen der Querschnittsminderung der tragenden Außenwand. Bei den Schlitzarbeiten muss auf ein Mauerwerksgefüge schonendes Stemmen mit Schlitzwerkzeug geachtet werden. Abbildung 57 a zeigt die Simulation der Ausführung, welche realisiert wurde. Bei der ausgeführten Variante hat sich die Schlitztiefe technisch bedingt reduziert. Dabei wurde die maximal mögliche Schlitztiefe von 65 mm ausgenutzt. Die Schlitzbreite beträgt 40 mm. Diese Variante ermöglicht die Installation einer eventuellen Zusatzheizung bei ungenügendem Wärmestrom der Außenwandaktivierung. Diese Zusatzheizung ist in Form einer oberflächennahen Heizungsschleife unter dem Fenster (s. Abbildung 57 b) oder einem Heizkörper denkbar. Die Zusatzheizung wurde jedoch zunächst nicht realisiert. Es wurde untersucht und festgestellt, ob die Heizschleifen für den benötigten Wärmebedarf ausreichend sind

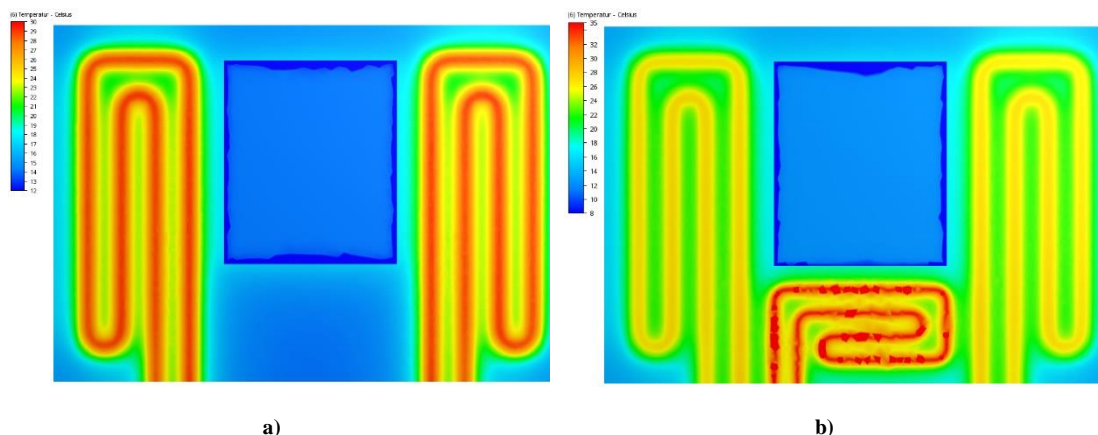


Abbildung 57: Simulation der realisierten Leitungsausführung: a) ohne und b) mit optionaler Zusatzheizungsschleife

Die Tabelle 17 zeigt die Simulationsergebnisse verschiedener Temperaturszenarien mit jeweils drei Wandaufbauvarianten: die Variante ohne Rohrleitungen in der Wand (ohne

die thermische Aktivierung), die Variante mit Rohrleitungen in der Wand und die Variante mit Rohrleitungen und Dämmung hinter den Rohrleitungen. Das soll den Wärmestrom in Richtung der Außenluft minimieren. Alle Varianten gehen von neuen Fenstern mit Wärmeschutzverglasung ($U_W=1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) aus. Die Materialkombination wurde aufgrund der im Kapitel 4.7 beschriebenen thermischen und physikalischen Eigenschaften ausgewählt.

Tabelle 17: Ergebnisübersicht der Simulationen zu der realisierten Leitungsausführung

Innenraumlufitemperatur Außenlufitemperatur	in °C	Temperaturszenario I 18 -5			Temperaturszenario II 20 -5			Temperaturszenario III 20 -16		
Parametervariation für Simulationen: Leitungsröhre: Rautherm-S (20x2 mm) Dämmung: Armaflex (10 mm) Deckstoff: Estrich-Zement Geschwindigkeit des Wassers: 0,2 m/s Vorlufitemperatur: 35 °C		Ohne thermisch aktivierter Außenwand + EnEV-Fenster	Mit thermisch aktivierter Außenwand (Teta_VL = 35 °C) + EnEV-Fenster	Mit thermisch aktivierter Außenwand mit Dämmung (Teta_VL = 35 °C) + EnEV-Fenster	Ohne thermisch aktivierter Außenwand + EnEV-Fenster	Mit thermisch aktivierter Außenwand (Teta_VL = 35 °C) + EnEV-Fenster	Mit thermisch aktivierter Außenwand mit Dämmung (Teta_VL = 35 °C) + EnEV-Fenster	Ohne thermisch aktivierter Außenwand + EnEV-Fenster	Mit thermisch aktivierter Außenwand, (Teta_VL = 35 °C) + EnEV-Fenster	Mit thermisch aktivierter Außenwand, mit Dämmung (Teta_VL = 35 °C) + EnEV-Fenster
Flächengemittelte Oberflächentemperatur Wand		14,4	22,5	22,2	16,1	23,6	23,3	14,4	22,7	22,3
Flächengemittelte Oberflächentemperatur Fenster	in °C	12,2	13,6	13,6	13,7	15,2	15,3	10,9	13,0	13,1
Flächengemittelte Oberflächentemperatur Wand + Fenster		14,0	20,9	20,7	15,7	22,1	21,9	13,8	21,0	20,7
Flächengemittelte Temperatur aller Oberflächen		17,5	18,4	18,3	19,5	20,3	20,2	19,2	20,1	20,1
Rücklufitemperatur		-	32,9	33,1	-	33,0	33,3	-	32,7	33,0
Gesamtwärmeabgabe Wandaktivierung		-	642,4	574,2	-	600,2	535,9	-	680,8	601,7
Nach außen gerichteter Wärmestrom Wand		250,8	-317,2	-297,9	272,6	-252,4	-232,7	392,6	-188,1	-162,3
Nach außen gerichteter Wärmestrom Fenster		88,6	67,7	67,2	96,3	73,9	72,8	138,7	106,9	105,2
Nach außen gerichteter Wärmestrom Fenster + Wand + Fensterlaibung	in W	395,3	-208,0	-186,1	429,2	-132,0	-110,1	618,7	-11,6	16,9
Wärmestrom von Außenseite Außenwand in Richtung Außenluft		269,5	-416,1	-380,3	292,9	-424,4	-396,4	-421,8	-576,4	-520,2
Lüftungswärmebedarf bei n = 0,5			209,5			227,7			327,9	

Bei der Wärmestrombetrachtung werden auch das Fenster und die Fensterlaibungen berücksichtigt, um alle Energieflüsse aus oder in den Raum zu betrachten. Die gelb hinterlegte Zeile zeigt den Wärmestrom aller innenliegenden Flächen (Wand, Fenster, Fensterlaibung). Die Wärmeabgabe der Variante mit Dämmung ist niedriger als die Wärmeabgabe der Variante ohne Dämmung, da sich durch die Dämmung der Wärmewiderstand erhöht und somit weniger Wärme in die Ziegelwand übergeht. Bei Temperaturszenario I werden insgesamt bei der Variante ohne Dämmung 208 W an die Raumluft abgegeben, mit Dämmung hinter den Heizleitungen werden 186 W an die Raumluft abgegeben, also 12 W (10,6 %) weniger. Der Wärmestrom von der Außenluft berührenden Außenwand an die Außenluft verringert sich durch die Dämmung von 416 W auf 380 W (Differenz = 36 W bzw. 6,3 %). Der Lüftungswärmebedarf bei n = 0,5 beträgt im Wohnzimmer 209,5 W. [94] Somit kann die Innenraumtemperatur in der Theorie auf 18 Grad gehalten werden, da der Lüftungswärmebedarf vom Wärmestrom der temperierten Außenwand in etwa gedeckt wird. Bei Temperaturszenario II liegt der Lüftungswärmebedarf um 110 W über dem nach innen gerichteten Wärmestrom der Außenwand von 110,1 W (mit Dämmung). Bei ein bis zwei Menschen, die als zusätzliche Wärmequelle dienen, könnten also

auch die 20 °C aufrecht gehalten werden (je nach Aktivitätsgrad). Bei Temperaturszenario III ist der Wärmestrom mit 16,9 W bei der Variante mit Dämmung hinter der Heizleitung nach Außen gerichtet. Bei -16 °C lassen sich in der Theorie durch die Außenwandaktivierung bei einer limitierten Vorlauftemperatur von 35 °C nur noch 17 °C erreichen und keine Deckung des Lüftungswärmebedarfs. Wenn die Vorlauftemperatur aber auf 50 °C erhöht wird, verringert sich der Wärmestrom von -16,9 W auf 194 W, das 59% vom Lüftungswärmebedarf bedeckt.

6.4.2 Untersuchungen mit IDA ICE

Für die Simulationen mit IDA ICE wurden Rahmenbedingungen festgelegt, die es ermöglichen, Aussagen über die energetische Bewertung des Quartiers zu treffen. Die Gebäudemodelle, die als Ausgangsbasis für Simulationen dienen, wurden aus der vorhandenen 2D Zeichnungen gebildet. Die Gebäude besitzen unterschiedliche Wohnungstopologien und somit unterschiedliche Grundrisse. Dies kann zu Ungenauigkeit in der Modellbildung führen, da kleinere Unterschiede vernachlässigt wurden. Bei der Modellbildung sei es wichtig, möglichst viele Details der Gebäudehülle, wie die Laibungstiefe und Brüstungshöhe der Fenster ins Modell zu übertragen. Die beeinflussen die Energieflüsse und den Sonnenertrag.

Bei der Betrachtung eines Gebäudes bzw. des ganzen Blocks wird nur die Außenhülle gezeichnet, um den Eingabeaufwand für die Daten zu verringern.

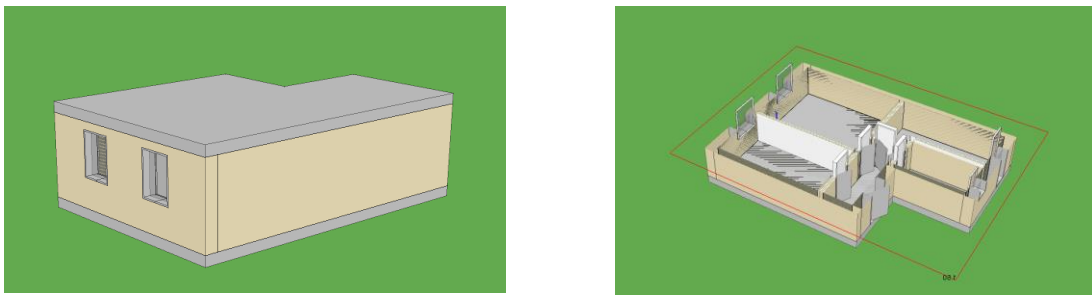


Abbildung 58: 3D Modell und Schnitt des Versuchsraumes

Die Innenwände innerhalb von Wohnungen werden ignoriert, da sie wenig Einfluss auf die gesamten Energieflüsse haben.

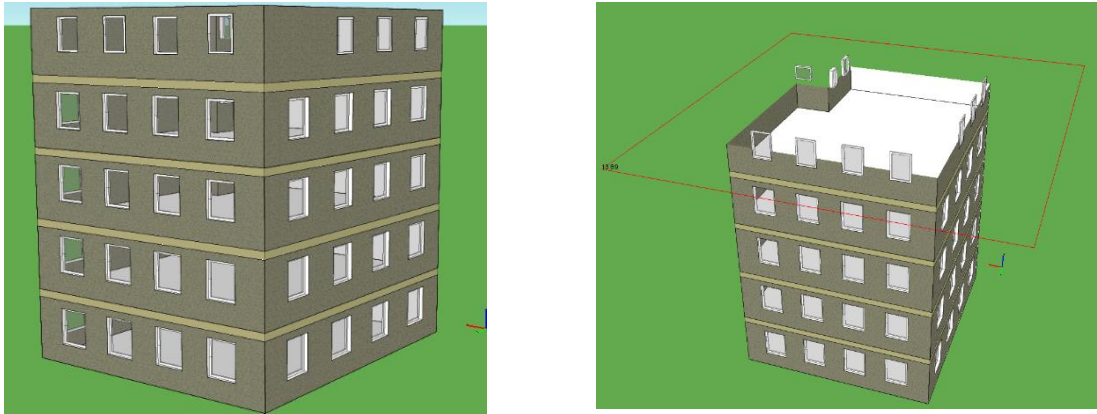


Abbildung 59: 3D Modell und Schnitt der Renata Straße 17

Um den Einfluss der Verschattung durch benachbarte Gebäude und Bäume auf den Endenergiebedarf beurteilen zu können, wird ein 3-D-Modell der Renatastr. 17 mit Verschattungselementen erstellt.



Abbildung 60: 3-D-Modelle der Renatastr. 17 mit Verschattungselementen

Die U-Werte, die hinter jedem Bauteil hinterlegt sind, beruhen auf Annahmen und teilweise auf dem Baujahr nach DIN EN 12831-1. Bei der Simulation des Versuchsraumes wurden die Innenwände detailliert betrachtet, da die Geometrie relativ einfach ist.

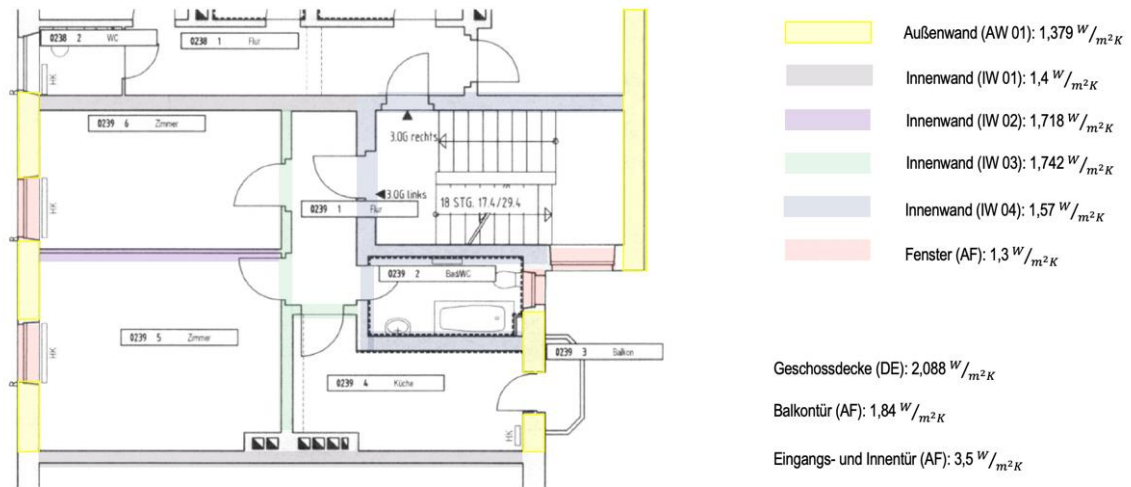


Abbildung 61: U-Werte der Bauteile für den Versuchsraum

Die Fenster werden im Zuge der Baumaßnahmen gemäß der Energieeinsparverordnung ausgetauscht werden. Dementsprechend werden die Fenster mit einem Gesamt-U-Wert laut EnEV von $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ berücksichtigt. Dadurch, dass IDA ICE Fenstertüren nicht getrennt abbilden kann, wurde für die Balkontüren ein hoher Rahmenanteil von 0,6 angenommen. Der Gesamt-U-Wert der Balkontüren beträgt somit $1,84 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die Simulationen ermöglichen Aussagen über den Endenergiebedarf, Primärenergiebedarf, Treibhausgasemissionen und Behaglichkeit zu treffen.

Zum Endenergiebedarf zählt einerseits der Heizenergiebedarf zur Sicherstellung der geforderten Raumtemperatur. Die Innentemperaturen werden gemäß DIN EN 12831 Beiblatt 1 definiert (s. Tabelle 18).

Andererseits ist die Energie für die Warmwasserbereitung zu betrachten. Um den Anteil am Endenergiebedarf zu bestimmen, wird gemäß Tabelle B.5 der DIN EN 12831-3 ein gemittelter Warmwasserbedarf von 30 Liter pro Person und pro Tag angenommen. Hier ist die starke Abhängigkeit des Warmwasserbedarfs vom Nutzerverhalten zu erwähnen.

Bei der Simulation der Variante mit der Bauteilaktivierung werden folgende Eckdaten aus der Simulation mit CFD als Basis für die Auslegung des Heizsystems festgehalten:

Auslegungsleistung	$74 \text{ W}/\text{m}^2$
dT (Wasser) bei Auslegungsleistung	$3 \text{ }^\circ\text{C}$
Einbautiefe (Abstand von Oberfläche)	$0,045 \text{ m}$
Wärmeübergangskoeffizient	$7,69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Tabelle 18: Norm-Innentemperaturen der unterschiedlichen Räume

Raumart	Norm-Innentemperatur, °C
Wohnzimmer	20
Schlafzimmer	20
Küche	20
Flur	20
Bad/WC	24
Treppenhaus	15

Die Auslegungsleistung bezieht sich auf die rot markierten Flächen in Abbildung 62. Die Flächen unterhalb und oberhalb der Fenster werden bei der Auslegungsleistung nicht berücksichtigt.

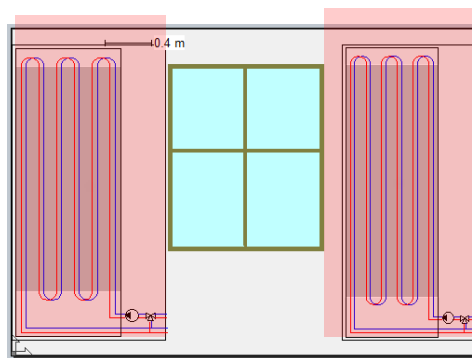


Abbildung 62: Innenansicht der Außenwand im Wohnzimmer mit Heizfläche

Dadurch, dass der Flur an keine Außenwand grenzt, wird mit einer konventionellen Heizung simuliert.

Zur Ermittlung des Gesamtprimärenergiebedarfs wird der Energiebedarf je Energieträger mit dem zugehörigen Primärenergiefaktor multipliziert. Der Primärenergiebedarf ist eine Bewertungsgröße der Ökobilanz (Treibhausgasemission). Für die Wärmeerzeugung im Quartier wird ein Primärenergiefaktor von 0,11 festgelegt. [95]

Das Treibhausgasemissions-Minderungspotenzial lässt sich anhand des äquivalenten Kohlenstoffdioxidausstoßes (CO₂-Emission) quantifizieren. Das CO₂-Äquivalent steht in Abhängigkeit der Energieträger und Energiebedarf. CO₂-Äquivalente sind ebenfalls nach der DIN V 18599-1 festgelegt und berücksichtigen auch Emissionen in vorgelagerten Prozessketten (s. Tabelle 19). Das CO₂-Äquivalent für Fernwärme soll aufgrund des Energieträgermixes individuell bestimmt werden.

Tabelle 19: Primärenergiefaktoren unterschiedliche Energieträger

Energieträger	Primärenergiefaktor	CO ₂ -Äquivalent, [g/kWh]
Erdgas bzw. Flüssiggas	1,1	240
Fernwärme	0,11*	209**
Strom	1,8	160***
* Stadtwerke München: https://www.swm.de/privatkunden/m-fernwaerme.html ** Referat für Gesundheit und Umwelt – Die Zukunft des Münchener Wärmemarktes, Seite 17 ***Gemis 4.7		

Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit wird durch zwei Kenngrößen gemessen. Die operative bzw. empfundene Temperatur beschreibt den Mittelwert aus der Raumlufttemperatur und Strahlungstemperatur der Umgebungsoberflächen. Die zweite Größe wird anhand des PPD-Index (predicted percentage of dissatisfied) bestimmt. Der PPD-Index wird nach DIN EN ISO 7730 definiert und beschreibt den vorausgesagten Prozentsatz an unzufriedene Personen. Der PPD-Index wird aus dem PMV-Index (predicted mean vote) abgeleitet und beschreibt wiederum das Wärmeempfinden der Person im Raum auf einer siebenstufigen Bewertungsskala.

Tabelle 20: Bewertungsskala des Wärmeempfindens

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

Die Gebäudesimulation mit IDA ICE liefert weitere verwertbare Ergebnisse. Der Solarertrag hauptsächlich durch die Fenster wird hier veranschaulicht. Der Verlauf in Abhängigkeit mit dem Sonnenstand und mit der Ausrichtung der Öffnungen wird untersucht. Aussagen zur Tageslichtintensität in den Räumen wird mittels einer Tageslichtsimulation getroffen. Die Simulation wird zu unterschiedlichen Uhrzeiten und zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt und verglichen. Die Lichtintensität wird an festgelegten Punkten gemessen.

Interne Lasten beeinflussen ebenfalls die Energieflüsse im Gebäude. Diese Lasten bestehen aus der Wärmeabgabe von Personen, Geräten und Beleuchtung. Sie werden über Zonenprofile bzw. Zeitpläne ins Modell integriert. Bei den Zeitprofilen der Personenbelegung entspricht 1,0 einer Vollbelegung des Raumes und 0,0 einer Personenabwesenheit. Die Zeitprofile beruhen auf der DIN V 18599-11. Bei den Zeitprofilen der Beleuchtung ist bei 1,0 das Licht eingeschaltet und bei 0,0 ausgeschaltet. Bei den Zeitprofilen der Geräte bedeutet 0,5, dass die Geräte jeweils nur zu 50 % in Betrieb sind, weil sämtliche Geräte selten gleichzeitig genutzt werden. Aufgrund der relativ guten durchmischten Altersstruktur des Quartiers, wurde bei der Erstellung der Zeitpläne ein Durchschnittsalter von 60 Jahren festgelegt.

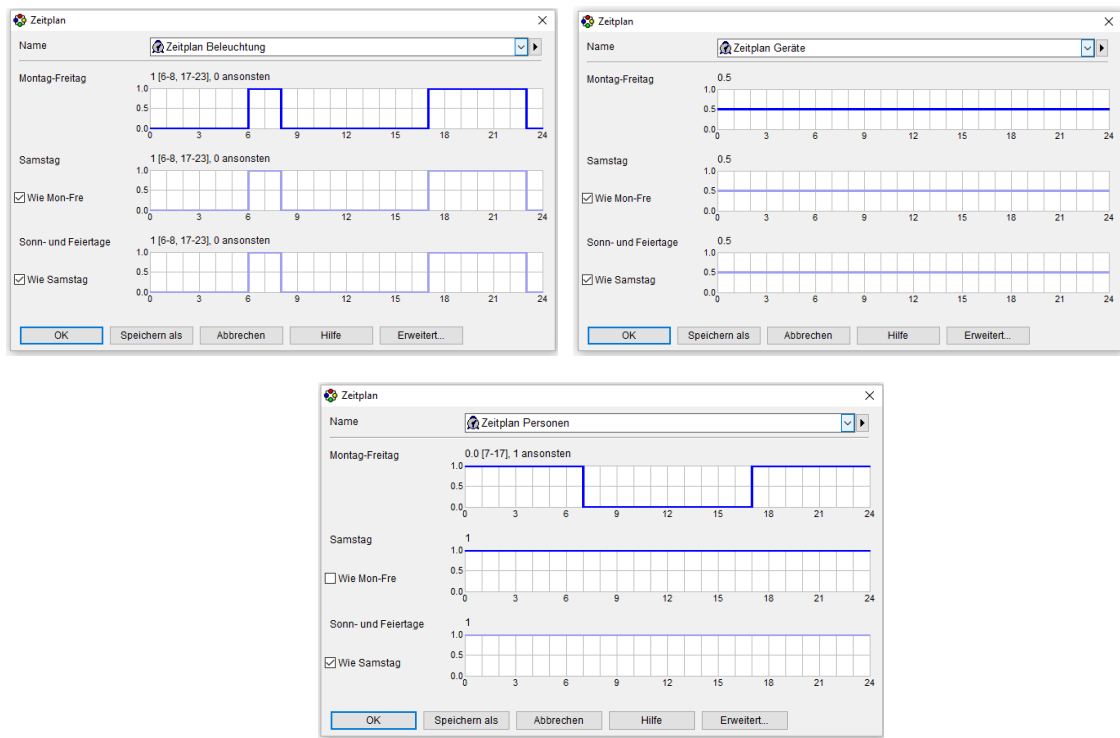


Abbildung 63: Zeitprofile der Beleuchtung, Geräte und Raumbelugung durch Personen

7 Ergebnisse Feldversuch / Laborwohnung

Folgender Abschnitt soll die Ergebnisse darlegen, welche in der Versuchswohnung, beziehungsweise in dem Reallabor entstanden sind.

7.1 Aufbau der Versuchswohnung

Der Aufbau der Versuchswohnung diene gleichzeitig der Untersuchung zur Machbarkeit der Umbaumaßnahmen im bewohnten Zustand. Daher wurden während der Schlitzarbeiten Staubbelastungsmessungen durchgeführt und auch bei der Heizungsinstallation wurden Zeiten notiert und darauf geachtet, ob der entsprechende Handgriff auch während eines bewohnten Zustands durchgeführt werden könnte. Als kritische Handgriffe können alle Bausubstanz-entfernende Arbeiten, wie das Schlitzzen und das Bohren durch Wände angesehen werden. Entsprechende Maßnahmen können die Staubentwicklung erheblich reduzieren.

Abbildung 64 zeigt die Leitungsführung in der Wand und zum Wärmerezeuger. Bei der Anbindung wurde darauf geachtet, dass beide Seiten rechts und links vom Fenster möglichst hydraulisch abgeglichen sind (Tichelmann-Prinzip).

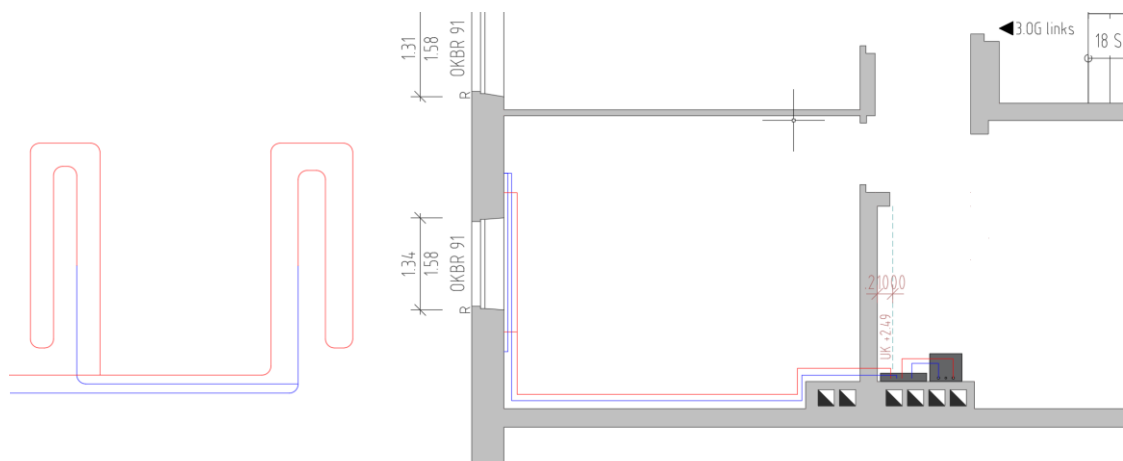


Abbildung 64: Leitungsführung Versuchswohnung

Die Leitungen werden im Sockelleistenbereich zur Wohnungsstation in der Küche geführt. Über der Wohnungsstation hängt die Gastherme.

7.1.1 Schlitzarbeiten

Als erste Baumaßnahme wurden am 14.10.2019 die Schlitzarbeiten durchgeführt. Die Tiefe und die Anordnung der Schlitzze wurden vorher mit einem Statiker besprochen. Sie

sollen nicht tiefer als 60 mm in das Mauerwerk gehen. Die Länge der horizontal verlaufenden Schlitzes soll minimal sein. Die Putzdicke beträgt 20 mm. Vor Ort wurde entschieden, dass die maximale Tiefe der Mauernutfräse ausgenutzt wird und auf das Abschlagen des alten Putzes verzichtet wird. Das Abschlagen des Putzes auf einer Probestfläche hat gezeigt, dass der Arbeitsaufwand zu hoch ist. Es entsteht also eine Schlitztiefe von 65 mm (inkl. Putzschicht).

Erste Probemessungen zur Staubentstehung wurden im Büro in Berlin gemacht. Hier lag die Staubbelastung bei $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Beginn der Staubmessung in der Versuchswohnung im Wohnzimmer war um 10:45 Uhr. Erster Schlitzversuch von 2 m Länge hat in etwa 5 Minuten gedauert. Abbildung 65 zeigt die Wand nach der Bearbeitung mit der Mauernutfräse. Abbildung 66 zeigt den Testschlitz, nachdem das Mauermaterial herausgestemmt wurde.



Abbildung 65: Testschlitz nach Mauernutfräse

(10:49 Uhr)



Abbildung 66: Testschlitz nach Stemmen

(11:23 Uhr)

In dieser Zeit hat sich der Staubgehalt außerhalb der Staubschutzwand nicht erhöht. Anschließend wurde das Staubmessgerät in die Staubzone gestellt. Innerhalb der Staubschutzwand wurde der Messbereich des Messgeräts überschritten ($>2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Nach Absaugung über das Abluftgerät fiel der PM_{2,5}-Wert auf $1300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tabelle 21 fasst den Verlauf der Probeschlitung zusammen.

Tabelle 21: Verlauf Probeschlitzung

		PM2,5	PM10
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
10:44	(Start) Außerhalb der Staubschutzwand im Wohnzimmer	40	30
10:48	Außerhalb der Staubschutzwand im Wohnzimmer	50	35
10:49	Im Staubbereich nach dem Schlitzen	>2000	>2000
10:53	Nach Einschalten der Absaugung über Fenster im Staubbereich nach dem Schlitzen	1300	>2000
11:00	Außerhalb der Staubschutzwand im Wohnzimmer	200	240

Zum Nachmittag erfolgten weitere Messungen. Auf der rechten Seite im isolierten staubbelasteten Bereich wurden die restlichen Schlitzte ausgeführt. Die Staubbelastung stieg leicht an, bis zu $980 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM10). Im Zeitraum dieser höheren Werte wurde die Stelle, an welcher der Putz bereits vorher entfernt wurde, mit der Mauernutfräse bearbeitet. Die Befragung des Handwerkers ergab, dass die Staubentwicklung an dieser Stelle besonders stark war. Abbildung 67 zeigt das freigelegte Mauerwerk.



Abbildung 67: Freigelegtes Mauerwerk, Außenwand, bestehend aus Ziegel und Kalksandstein

Sobald der Reißverschluss geöffnet wurde, stieg die Staubbelastung außerhalb der Staubschutzwand bis auf Werte außerhalb des Messbereiches an ($>2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabelle 22: Verlauf der Schlitzarbeit in Staubschutzbereich rechte Seite

		PM2,5	PM10
--	--	-------	------

		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
13:10	Start	23	26
13:12		25	27
13:14		24	29
13:16		140	200
13:18		640	980
13:20		300	450
13:22	Schlitzvorgang beendet, Reißverschluss der Staubschutzwand geöffnet	>2000	>2000
13:46	Stemmen beendet	>2000	>2000
13:48	Schutt sammeln und abtransportieren	>2000	>2000

Die linke Seite vom Fenster wurde zum Vergleich ohne Staubschutzwand bearbeitet.

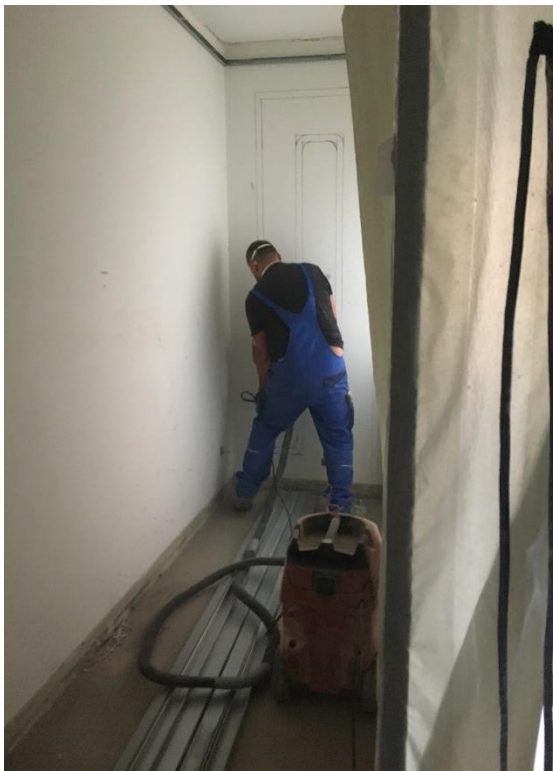


Abbildung 68: Handwerker beim Ausführen der Schlitzarbeit



Abbildung 69: Schlitz nach Mauernutfräse

Das Staubmessgerät wurde dafür im Flur positioniert (s. Abbildung 70). Das Wohnzimmer wurde im Öffnungsbereich für die Tür mit einer Folie behangen, welche jedoch nicht an den Rändern abgedichtet wurde.



Abbildung 70: Staubmessgerät (positioniert im Flur, während die Schlitzarbeiten ohne Staubschutzwand durchgeführt werden, ausschließlich mit Folie im Zimmereingang (jedoch nicht abgedichtet))

Da die Werte im Flur nicht mehr in den messbaren Bereich fielen ($> 2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$), wurde das Staubmessgerät ab 14:15 Uhr im Schlafzimmer positioniert. Auch hier lagen die Werte über $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sobald die Barriere also undicht ist, verteilt sich der Staub in der gesamten Wohnung.

Tabelle 23: Verlauf der Schlitzarbeit linke Seite (außerhalb der Staubschutzwand)

		PM2,5	PM10
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
13:47	(Start Schlitzarbeiten linke Seite ohne Staubschutzwand	190	282
13:53	Unterbrechung		
13:54	Fortsetzung	350	500
13:55		1000	1300
13:56	Unterbrechung	>2000	>2000
13:58	Fortsetzung	>2000	>2000
13:59		1500	>2000
14:02	Unterbrechung	>2000	>2000
14:05	Fortsetzung	>2000	>2000
14:06	Unterbrechung	>2000	>2000
14:09		>2000	>2000
14:15	Fortsetzung, Positionierung Staubmessgerät im Schlafzimmer	>2000	>2000
14:18	Schlitzarbeit beendet	>2000	>2000
Stemmarbeit			
14:19	Beginn Stemmen	>2000	>2000
14:26	Unterbrechung	>2000	>2000
14:28	Fortsetzung	>2000	>2000
14:34	Unterbrechung	>2000	>2000
14:36	Stemmen beendet	>2000	>2000
14:36	Schutt Abtransportieren	>2000	>2000
14:40	Abbau Staubwand	>2000	>2000
14:52	Arbeiten beendet	>2000	>2000
14:53	Reinigung, Aufräumen der Baustelle, Abtransport Geräte	>2000	>2000
14:57	Reinigung und Aufräumen der Baustelle beendet	>2000	>2000

Nach Fertigstellung der Schlitze wurde das Mauermaterial mit einem Stemmgerät entfernt (s. Abbildung 71). Abbildung 72 zeigt den entstehenden Schutt nach den Stemmarbeiten. Nach dem Herausstemmen wurde der Schutt abtransportiert, die Baustelle gereinigt und die Staubschutzwand abgebaut (s. Abbildung 73 und 74).



Abbildung 71: Schlitze nach Stemmarbeit



Abbildung 72: Entstehender Abfall (Schutt)



Abbildung 73: Abbau der Staubschutzwand



Abbildung 74: Rahmen der Staubschutzwand

7.1.2 Heizungsinstallation

Für die Wärmeerzeugung wurde eine wandhängende Gastherme eingebaut. Diese liefert der Wohnungsstation Heizwasser, über die ein Niedrigtemperaturkreis und Hochtemperaturkreis versorgt werden. Über den Niedrigtemperaturkreislauf wird die Außenwandaktivierung erwärmt. Als Zuleitung von der Wohnungsstation bis zur Außenwand wurde das C-Stahl Rohr von Geberit verwendet und innerhalb der Wand wurden die Rohre von Rehau Rautherm-S verlegt. Die Heizkörper in den restlichen Räumen werden durch den Hochtemperaturkreis versorgt.

Die Zuleitungen zu der Außenwand erfolgen im Fußleistenbereich. In der Wand wird ein Kunststoffrohr gelegt und dann mit den C-Stahlrohren verbunden.

Der Ablauf der Montage verlief wie folgt:

- Die Zuleitungen von der Wohnungsstation bis zur Wand und bis zum Heizkörper wurden gelegt
- Integration von Tauchhülsen für Temperaturmessung der Vor- und Rücklauftemperaturen (sowohl für thermische Außenwandaktivierung und für konventionellen Heizkörper im Referenzraum) Zwei Tauchhülsen vor Wandeintritt und zwei vor dem Heizkörper im Schlafzimmer
- Integration der Volumenstromsensoren in den Rückläufen der beiden Kreisläufe (Niedrig- und Hochtemperatur) für Wärmemengenberechnung
- Nachbessern der Schlitzbögen
- Zuschnitt Dämmung (Armaflex)
- Einklemmen/Einkleben der Dämmung
- Das „Rautherm-S“ Rohr wurde in der Wand verlegt
- Fixierung der Rohrbögen in der Wand
- Anschluss an Zuleitungen mit Pressverbindung
- Montage der Gastherme und der Wohnungsstation



Abbildung 75: Einlegen des Rehau Rautherm-S Rohres; Einlegen des Rehau Rautherm-S Rohres; Fixierung der Rohrbögen

Das C-Stahl Rohr ist durch die Bauweise und Stabilität besser, an der Wand zu verlegen und widerstandsfähiger gegenüber äußeren Einflüssen im Vergleich zu dem Rautherm-S Rohr. Damit das Rohr gegen Kondenswasser geschützt werden kann, wurden die Rohre mit einer 8mm dicken beschichteten Rohrdämmung ummantelt. Damit die Rohrschleifen links und rechts vom Fenster hydraulisch abgeglichen sind und damit der gleiche Volumenstrom fließen kann, wurde bei den Zuleitungen auf eine Leitungsführung nach dem Tichelmann-Prinzip geachtet. Die Heizkörper des Hochtemperaturkreislaufes lassen sich mittels voreinstellbarer Thermostatventile hydraulisch Abgleichen. Somit ist eine effiziente Wärmeverteilung möglich.

Nach Fertigstellung der Leitungslegung und nach dem Anschluss an die Wohnungsstation wurde das gesamte Leitungsnetz inklusive Wohnungsstation und Therme auf Undichtigkeiten mittels Druckluft geprüft. Anschließend wurde die Heizungsanlage mit aufbereitetem Wasser gefüllt. Es folgte die probeweise Aufheizung des Systems. Es wurden weitere Absperrventile vor dem Wandeintritt eingebaut, um die beiden Kreise separat abzusperren und zu entlüften.



Abbildung 76: Tauchhülsen für Temperatursensoren; Volumenstromsensoren; Gesamtansicht nach Leitungsinstallation vor Verputzen

Nachdem die Dichtheit des Systems überprüft wurde, konnten die Schlitze mit der Rohrleitung überdeckt, bzw. verputzt werden. Im weiteren Verlauf wurde die Heizungsregelung eingestellt. Die Regelung des Heizungssystems und die Erfassung der Messwerte erfolgt über die Regelung von Oventrop „Regtronic“.

Das kleine Zimmer (Schlafzimmer) soll als Referenzraum mit konventionellem Heizkörper dienen.



Abbildung 77: Schlafzimmer; Fenster; Heizkörper

Durch die langen Leitungswege hat sich das Entlüften der Leitungen schwieriger gestaltet als vorher angenommen. Die Entlüftung wurde an der Wohnungsstation über das Be- und Entlüftungsventil durchgeführt. Um den Prozess zu optimieren, wurden Absperrventile in die beiden Stränge eingebaut. Dadurch konnten beide Stränge voneinander unabhängig entlüftet werden. Damit konnten die beiden Heizkreise für die Wandaktivierung gut entlüftet werden. Die weiteren Montagearbeiten können anhand der hier dargestellten Arbeitsschritte optimiert werden. Dadurch ist eine schnellere Montage möglich, wenn statt einer Wohnung ein ganzes Quartier saniert wird.

Die Arbeiten wurden von zwei Heizungsmonteuren ausgeführt. Im Anschluss an die Heizungsarbeiten wurden die Heizungsmonteure befragt. Nach deren Aussage konnten die Montagearbeiten bis auf die Entlüftung der Rohre für die Wandaktivierung ohne weitere Probleme durchgeführt werden. Für die Entlüftung der Anlage wurde auch eine Lösung gefunden und umgesetzt. Durch die Erfahrungen, die in der Versuchswohnung bei den Montagearbeiten gewonnen wurden, können die Probleme schneller behoben und vermieden werden.

Eine weitere notwendige Maßnahme war die Installation der Innentüren. Da sich zum Zeitpunkt der Messungen noch kein fertiger Fußbodenbelag in der Wohnung befand, wurden die Türen nach unten mit Armaflex abgedichtet, um die Luftdichtheit der Innentüren zu verbessern, bzw. der Situation einer fertigen Wohnung mit schmalen Spalten unter den Innentüren gerecht zu werden.



Abbildung 78: Innentür mit Armaflex

7.2 Temperaturmessungen und Energiemengenberechnung

Für die Bewertung der Außenwandaktivierung, müssen Vergleichswerte generiert werden. Die Außenwandaktivierung kann sowohl im Winter als auch im Sommer betrieben werden. Im Winter soll die heizende Wirkung und in zukünftigen Vorhaben soll ebenfalls die kühlende Wirkung im Sommer untersucht werden. Für eine detaillierte Aussage über die verschiedenen Zonen des Raums, wird in einem vorher definierten Messraster die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit mit Datenloggern aufgenommen. So können Auswirkungen auf den Kaltluftabfall und der generellen Temperaturverteilung ermittelt werden. Die Auswertung der Messwerte der Heizperiode 2019/20 ergibt einen ersten Überblick über die Auswirkungen der Außenwandaktivierung und zeigt auf, welche Modifikationen am Versuchsstand durchgeführt werden müssen. Abbildung 79 zeigt den Verlauf aller innenliegenden Datenlogger im Überblick.

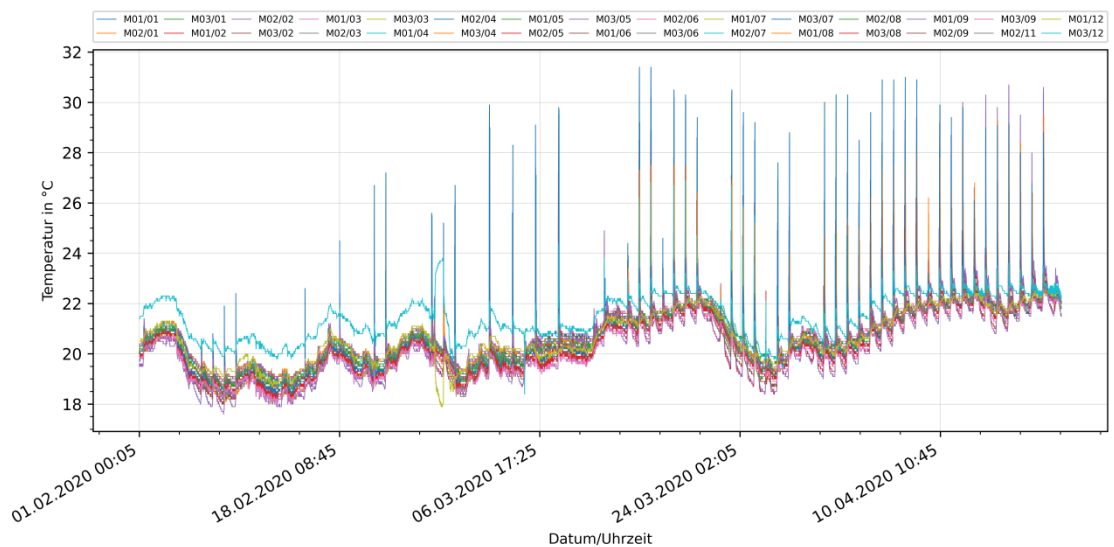


Abbildung 79: Übersicht Verläufe aller Datenlogger

Die starken Peaks in der Abbildung 79 sind durch die Sonneneinstrahlung zu erklären und geben nicht die tatsächliche Lufttemperatur wieder. Abbildung 80 zeigt den Temperaturverlauf der raummittig positionierten Datenlogger im Wohnzimmer, im Schlafzimmer und in der Küche. Die Messungen zeigen eine im Durchschnitt knapp 1 K höhere Lufttemperatur im Raum mit konventionellem Heizkörper (Schlafzimmer), wodurch Wärme durch die Zwischenwand in den Nachbarraum transmittiert wird. Diese Abbildung zeigt außerdem den Einfluss der Inbetriebnahme der thermischen Außenwandaktivierung. Am 6. März 2020 erfolgte eine Korrektur in der Regelung, sodass das System mit einer außenlufttemperaturgeführten Vorlauftemperatur betrieben wird, davor betrug die Vorlauftemperatur konstant ca. 20 °C, was in dem Verlauf der Vorlauftemperaturen zu sehen ist. Ab dem 6. März 2020 gleichen sich die Temperaturen der beiden Räume an. Eh die Außenwand erwärmt ist, vergehen jedoch einige Tage, was die Trägheit des Heizsystems verdeutlicht.

Abbildungen 81 und 82 zeigen die Messpunkte rechts vom Fenster in 30 cm (MXX/03) und 100 cm (MXX/06) Entfernung zur Außenwand. Vor dem 06.03.2020 ist der vertikale Temperaturgradient recht deutlich zu erkennen. M01/03 (2 m Höhe), M02/03 (1,3 m Höhe) und M03/03 (0,3 m Höhe) zeigen eine Temperatursteigerung von ca. 0,5 K je Meter. Bei der Messsäule MXX/06 sieht es sehr ähnlich aus. Mit der Korrektur der Regelung vom 06.03.2020 gleichen sich die Temperaturverläufe der Messpunkte in den verschiedenen Höhen an. Was für eine gleichmäßige Erwärmung des Raumes spricht. Vor allem die Temperaturverläufe der wandnahen Sensoren sind fast identisch.

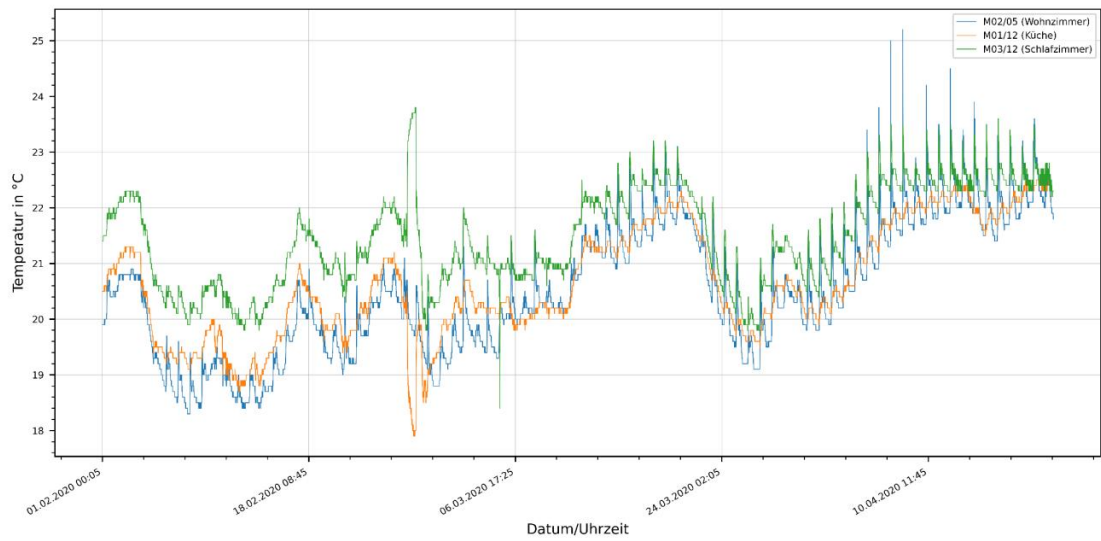


Abbildung 80: Vergleich der Räume, Messpunkte in Raummitte

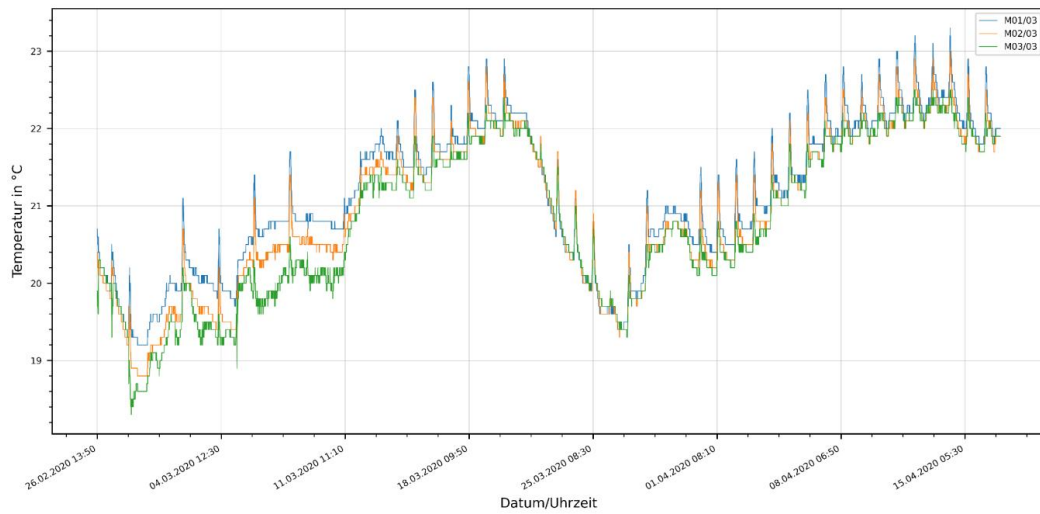


Abbildung 81: Messpunkte rechts vom Fenster in 30 cm Entfernung zur Außenwand

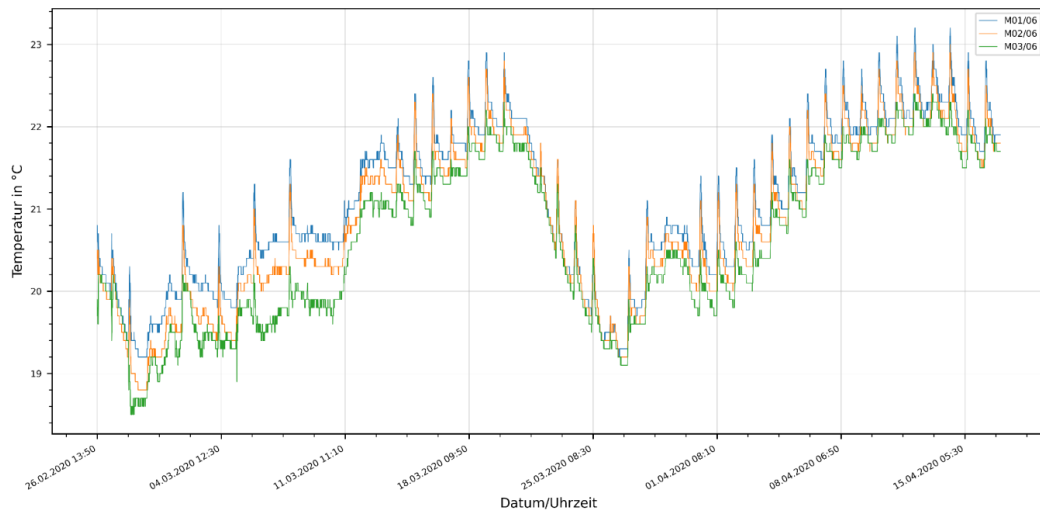


Abbildung 82: Messpunkte rechts vom Fenster in 100 cm Entfernung zur Außenwand

Abbildung 83 zeigt den Verlauf der Messpunkte M02/03, M02/06 und M02/09, also auf einer Höhe von 1,3 m mit einem Abstand zur Außenwand von 0,3 m, 0,7 m und 2,42 m (Raummittelachse) rechts vom Fenster.

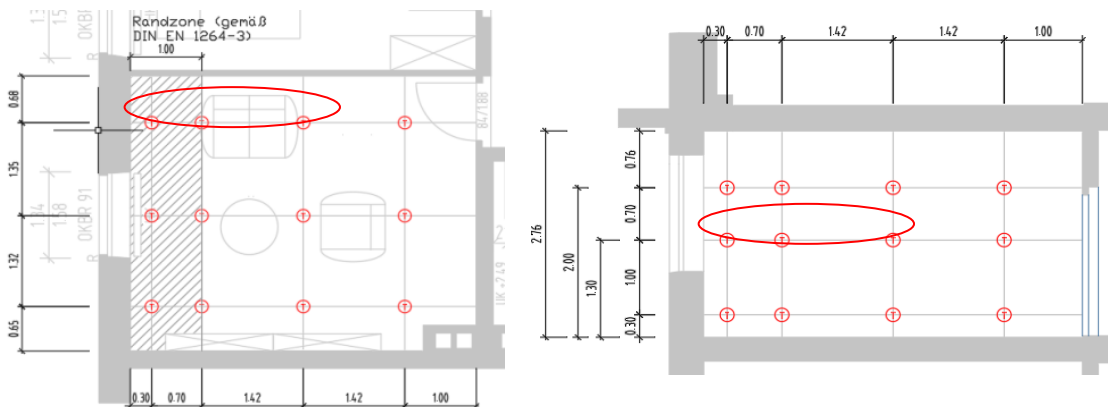


Abbildung 83: Kennzeichnung Messstellen im Messraster Schema 1 (links: Draufsicht, rechts: Schnitt)

Die verschiedenen Messpunkte zeigen einen ähnlichen Temperaturverlauf (s. Abbildung 84). Abbildung 85 stellt die gemessenen Temperaturen im Wohnzimmer und im Schlafzimmer dar, welche für den Monat März 2020 zeitlich gemittelt wurden. Im Wohnzimmer ist eine homogene Temperaturverteilung zu sehen. Im Schlafzimmer liegen in dieser Heizperiode nur Werte eines Datenloggers vor, wodurch eine räumliche Verteilung der Temperatur nicht abzuleiten ist.

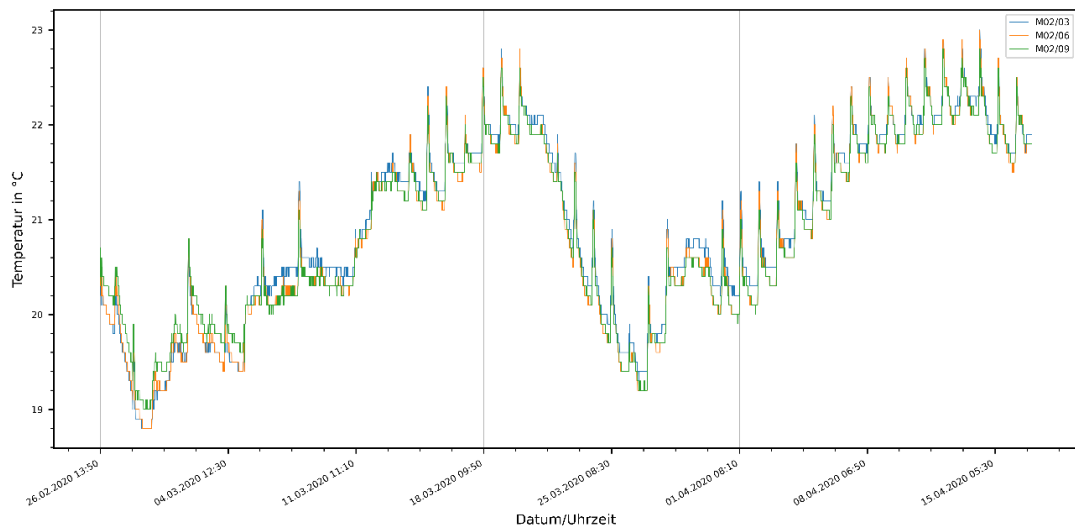


Abbildung 84: Horizontaler Temperaturverlauf rechts vom Fenster auf einer Höhe von 1,30 m

Abbildung 85: Darstellung der Verteilung der im Mittel gemessenen Temperaturen auf der mittleren Messebene (Ebene 2) des Monats März 2020 im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts)

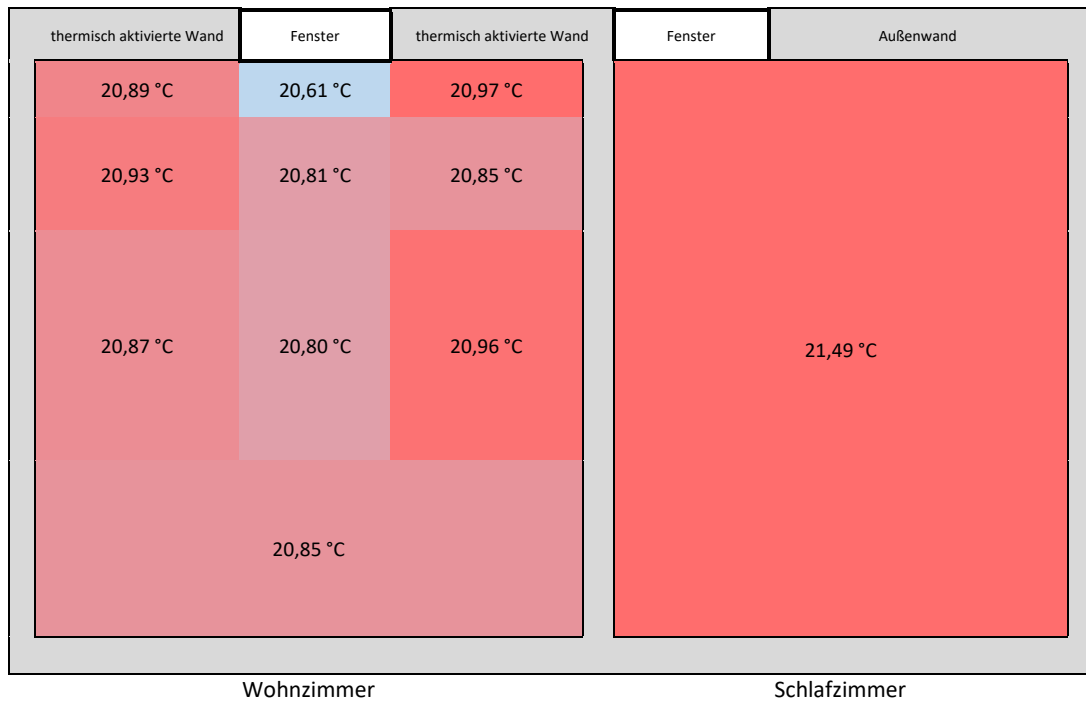


Abbildung 85: Darstellung der Verteilung der im Mittel gemessenen Temperaturen auf der mittleren Messebene (Ebene 2) des Monats März 2020 im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts)

Abbildung 86 zeigt die Leistungsverläufe der beiden Heizsysteme und die dazugehörige theoretische Heizlast zu den entsprechenden Temperaturverhältnissen als Referenz für

März 2020. Festzustellen ist, dass die Kurve der gemessenen Leistung der Außenwandaktivierung (blaue Linie) unterhalb der theoretischen Heizlast (orange Linie) des Raumes verläuft. Die Kurve der gemessenen Leistung des konventionellen Heizkörpers mit hohen Vorlauftemperaturen liegt über der theoretischen Heizlast. In der Zeit zwischen dem 12.03.2020 und dem 22.03.2020 bewirkte ein fehlerhafter Volumenstromsensor fehlende Messwerte zur Berechnung der Leistung. Für die Berechnung der theoretischen Heizlast bei entsprechenden Temperaturverhältnissen wird für die Außenwand ein U-Wert von $1,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ und für die zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgetauschten Fenster ein U-Wert von $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen.

Die durchschnittliche Raumtemperatur liegt im März im Wohnzimmer bei $20,36 \text{ }^\circ\text{C}$ und die durchschnittliche Raumtemperatur im Schlafzimmer bei $21,39 \text{ }^\circ\text{C}$, also in etwa eine Temperaturdifferenz von 1 K .

Der Energiebedarf wird durch die Regelung mit den Vor- und Rücklauftemperaturen und den Volumenströmen berechnet. Für den Zeitraum 01.03.2020 bis 31.03.2020 ergibt sich ein flächenspezifischer Energiebedarf von $18,73 \text{ kWh/m}^2$ bei der thermischen Aktivierung und $27,35 \text{ kWh}$ beim klassischen Heizkörper (s. Tabelle 24). Diese hohe Diskrepanz hat vermutlich einige Ursachen. Zum einen die Temperaturdifferenz der beiden Räume, die Undichtigkeit des alten Fensters mit dem zum Zeitpunkt der Messung ausgestemmtem Fensterbrett und die Wärmegewinne durch die Zuleitungen tragen dazu bei.

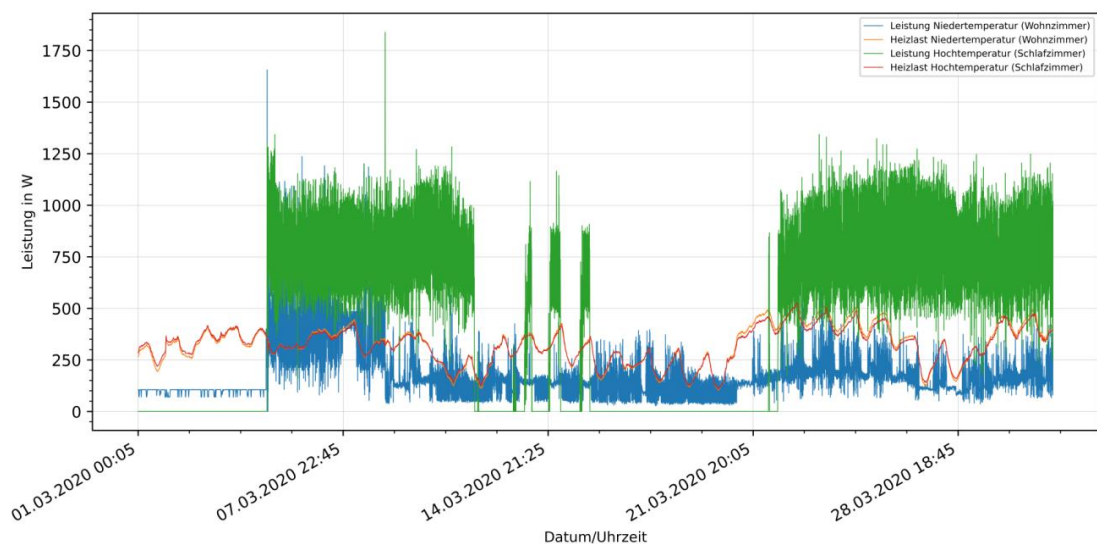


Abbildung 86: Leistungswerte der Heizung und die theoretische Heizlast beider Räume

Tabelle 24: Ergebnistabelle Monat März

		Wohnzimmer					Schlafzimmer		
		Zeitraum 06.03.2020 bis 31.03.2020	Gesamter Monat Hochrechnung	Gesamter Mo- nat März	Gesamter Mo- nat März	Gesamter Monat März	Zeitraum 06.03.2020 bis 31.03.2020	Gesamter Mo- nat März	Gesamter Monat Hochrechnung
Wärmemenge	Einheit	Niedertemperatur (Wohnzimmer)	Niedertemperatur (Wohnzimmer)	Berechnete Wärmeabgabe der Rohre im Wohnzimmer	Theoretischer Energiebedarf basierend auf den Tempera- turen	Niedertemperatur mit Wärmeabgabe der Rohre	Hochtemperatur (Schlafzimmer)	Theoretischer Energiebedarf basierend auf den Tempera- turen	Hochtemperatur (Schlafzimmer)
Energiemenge	kWh	115,78	138,05	222,66	240,86	360,71	307,40	191,4	366,51
flächenspezifisch	kWh/m ²	6,01	7,17	11,56	12,5	18,73	22,94	14,3	27,35

Die Abbildung 87 zeigt die Vorlauf- und Raumtemperaturverläufe der beiden Heizkreise im Monat März 2020, die Temperaturwerte des Außenfühlers an der Westfassade und die Raumlufttemperaturen der beiden untersuchten Räume.

Um den Einfluss der Vor- und Rücklaufleitungen zu berücksichtigen, wurden dessen Wärmeabgaben pauschal berechnet. Dazu wurden die Temperaturen über die relevante Periode gemittelt und somit eine konstante Leistung mittels Gleichung 10 berechnet [96]. Diese konstante Leistung fließt in die Tabelle 25 ein, indem die in dem Monat abgegebene Wärmemenge berechnet wird (222 kWh/Monat März)

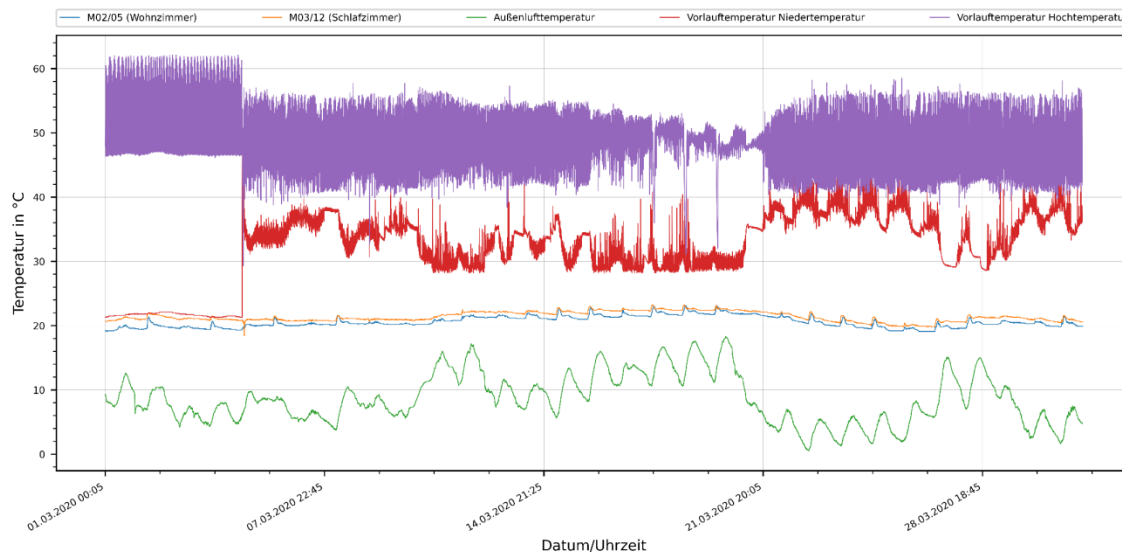


Abbildung 87: Vorlauf-, Raum- und Außentemperaturen März 2020

Tabelle 25: Zeitliche Mittelung der Vor- und Rücklauftemperaturen im Monat März 2020

		Niedertemperaturkreislauf	Hochtemperaturkreislauf
Durchschnittstemperatur VL	°C	33,92	48,09
Durchschnittstemperatur RL	°C	32,89	42,07

$$Q_R = \frac{\pi \cdot L \cdot (\vartheta_M - \vartheta_L)}{\frac{1}{\alpha_i \cdot d_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_n} \cdot \ln\left(\frac{d_{a,n}}{d_{i,n}}\right) + \dots + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a}} \quad \text{Gl. 10}$$

mit

 Q_R = Gesamtwärmestrom (W) ϑ_M = Mediumtemperatur (°C) ϑ_L = Lufttemperatur (°C) α_i = Wärmeübergangskoeffizient innen (W/(m²*K)) α_a = Wärmeübergangskoeffizient außen (W/(m²*K)) d_i = Innendurchmesser des Mediumrohrs (m) d_a = Außendurchmesser der äußersten Schicht (m) $d_{i,n}$ = Innendurchmesser der Schicht n (m) $d_{a,n}$ = Außendurchmesser der Schicht n (m) λ_n = Wärmeleitfähigkeit der Schicht n (W/(m*K)) L = Rohrlänge (m)

Da die Auswertung der Messwerte zeigte, dass sich die Temperaturen einiger Datenlogger kaum unterscheiden, wurde für die Heizperiode 2020/21 das Raster modifiziert, um mehr Datenlogger zu Vergleichszwecken im Schlafzimmer zu positionieren und somit Aussagen über die Temperaturverteilung treffen zu können. In der Raummitte werden drei Datenlogger verwendet. In dem Bereich 0,3 m vor der Außenwand bleiben die 9 Datenlogger erhalten. Einen Meter vor der Außenwand bleiben nur die Datenlogger auf 1,30 m Höhe. Im Schlafzimmer werden 3 Datenlogger vor der Außenwand rechts vom Fenster positioniert und 3 Datenlogger mittig vor dem Fensterbereich in 0,3 m Entfernung zur Außenwand. Raummittig wird ebenfalls eine Messsäule mit 3 Messpunkten installiert und noch 3 Datenlogger mit den gleichen Abständen zur Außenwand wie im Wohnzimmer. Das aktualisierte Messraster ist Abbildung 88 zu entnehmen.

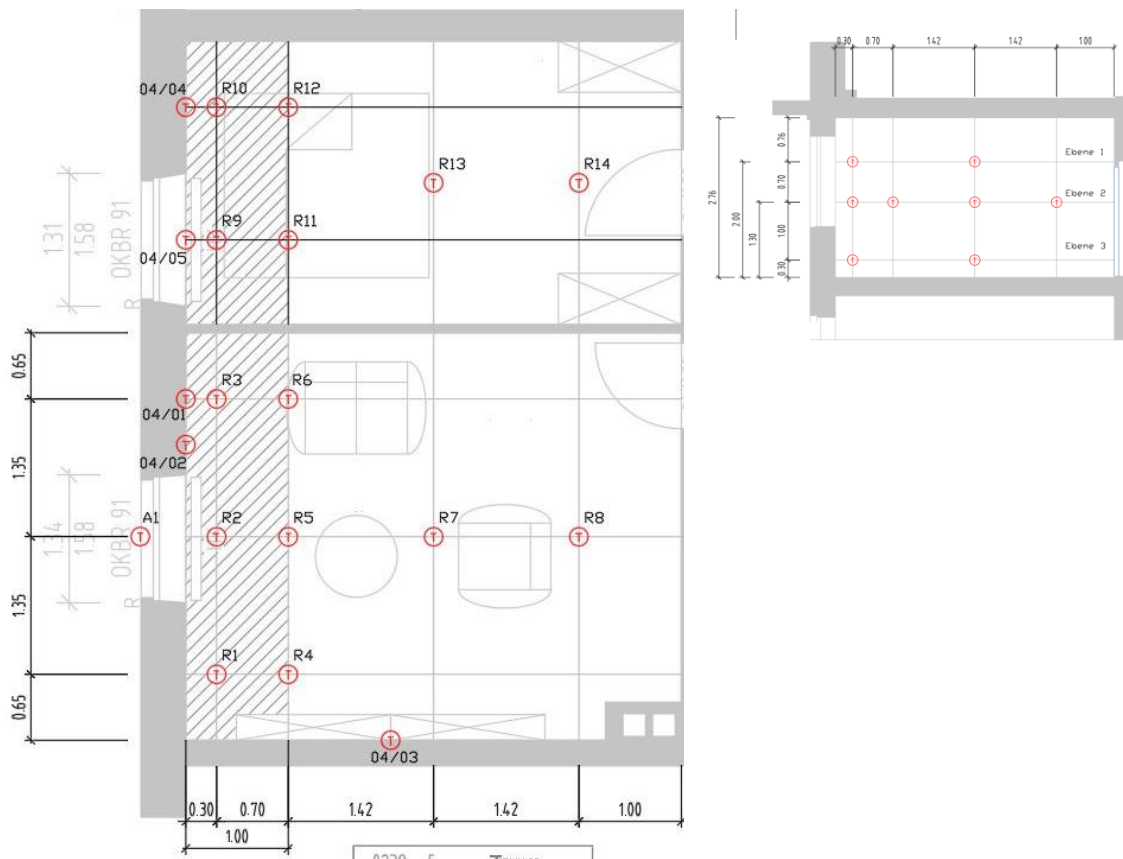


Abbildung 88: Links: Grundriss Messraster Schema 2 (Heizperiode 2020/21), rechts: Schnitt Messraster

Für die Winterperiode 2020/21 wurden daher die Zuleitungen im Wohnzimmer mit 4 cm starken Polystyrol-Platten verkleidet, wie in Abbildung 89 zu sehen ist. Ein gewisser Wärmestrom ist dadurch, wie an der Thermografie-Aufnahme zu sehen, trotzdem nicht zu vermeiden.

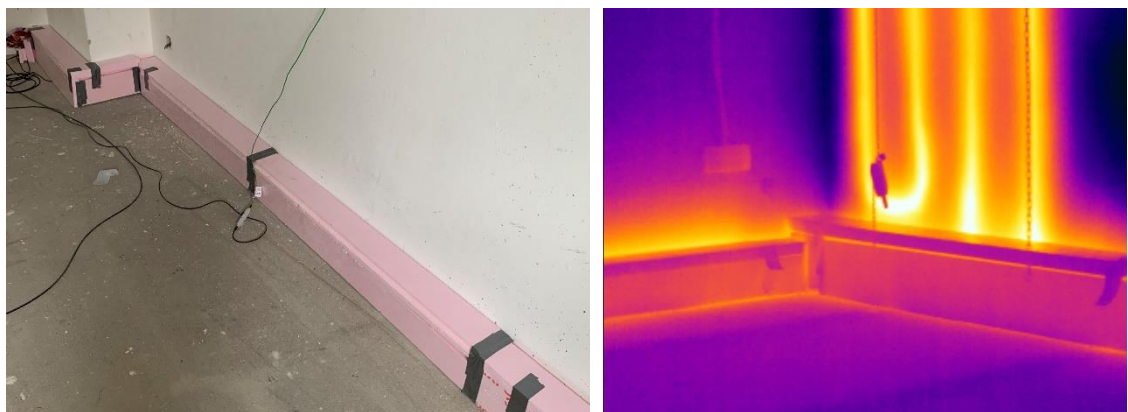


Abbildung 89: Polystyrol-Verkleidung der Zuleitungen (links) mit Thermografie-Aufnahme (rechts)

Somit konnte rechnerisch die Wärmeabgabe auf 36,9 kWh reduziert werden. Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse zu den Wärmemengen des Monats November 2020. Da der Volumenstromsensor in der Heizperiode 2020/21 keine Messwerte aufgenommen hat, musste, um überhaupt eine Leistungskurve zu erzeugen, ein konstanter Volumenstrom angenommen werden. Es wurden 0,33 l/min (20 l/h) angenommen.

Tabelle 26: Ergebnistabelle Wärmemenge November 2020

		Wohnzimmer				Schlafzimmer	
Zeitraum		November 2020				November 2020	
Wärmemenge	Einheit	Außenwand-aktivierung	Berechnete Wärmeabgabe der Rohre	Wärmemenge mit Wärmeabgabe der Rohre	Theoretischer Energiebedarf basierend auf den Temperaturen	Heizkörper	Theoretischer Energiebedarf basierend auf den Temperaturen
Wärmemenge	kWh	110,6	36,9	147,5	233,3	267,1	180,7
Flächenspezifische Wärmemenge	kWh/m ²	5,74	1,9	7,64	12,1	19,9	13,5

Tabelle 27 zeigt die zeitlich gemittelten Vorlauf- und Rücklauftemperaturen der beiden Heizkreise für den Monat November 2020.

Tabelle 27: Zeitlich gemittelte Vorlauf- und Rücklauftemperatur für den Monat November 2020

		Niedertemperaturkreislauf	Hochtemperaturkreislauf
Durchschnittstemperatur VL	°C	33,9	44,15
Durchschnittstemperatur RL	°C	32,8	27,7

Für den Monat November 2021 ergeben sich folgende durchschnittliche Raumlufttemperaturen nach Tabelle 28. Es konnte im Mittel etwa die gleiche Temperatur erreicht werden. Auch die Werte für die zeitlich gemittelte relative Raumluftfeuchtigkeit gleichen sich mit etwa 43 %.

Tabelle 28: Gemittelte Temperaturen und relative Luftfeuchtigkeit für den Monat November

		Wohnzimmer Raummitte (M02/07)	Schlafzimmer Raummitte (S02/05)	Küche Raummitte
Raumlufttemperatur	°C	19,73	19,76	18,4
Relative Luftfeuchtigkeit	%	43,33	42,82	40,88

Abbildungen 90 und 91 zeigen die Temperaturverläufe im Wohnzimmer und im Schlafzimmer in der Raummitte in drei verschiedenen Höhen für den Monat November 2020. Im Wohnzimmer gibt es fast keinen Temperaturunterschied zwischen 0,3 m, 1,3 m und 2,0 m über dem Fußboden. Im Schlafzimmer ist eine deutliche Temperaturschichtung festzustellen. Außerdem sind starke zeitliche Schwankungen festzustellen, was mit der hohen Vorlauftemperatur des Heizkörpers zu erklären wäre, wodurch das Thermostatventil oft auf und zu schaltet.

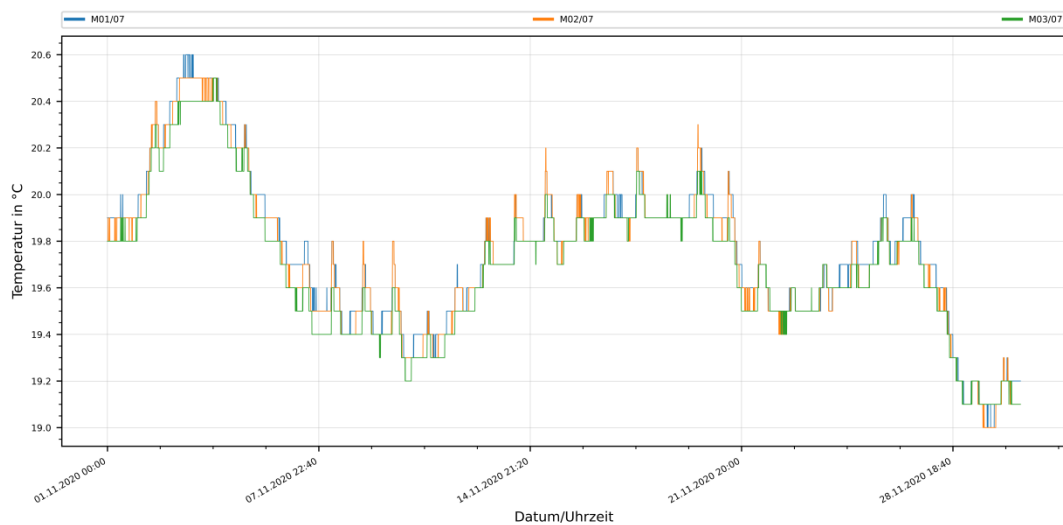


Abbildung 90: Vertikaler Temperaturverlauf Raummitte Wohnzimmer Reihe 7

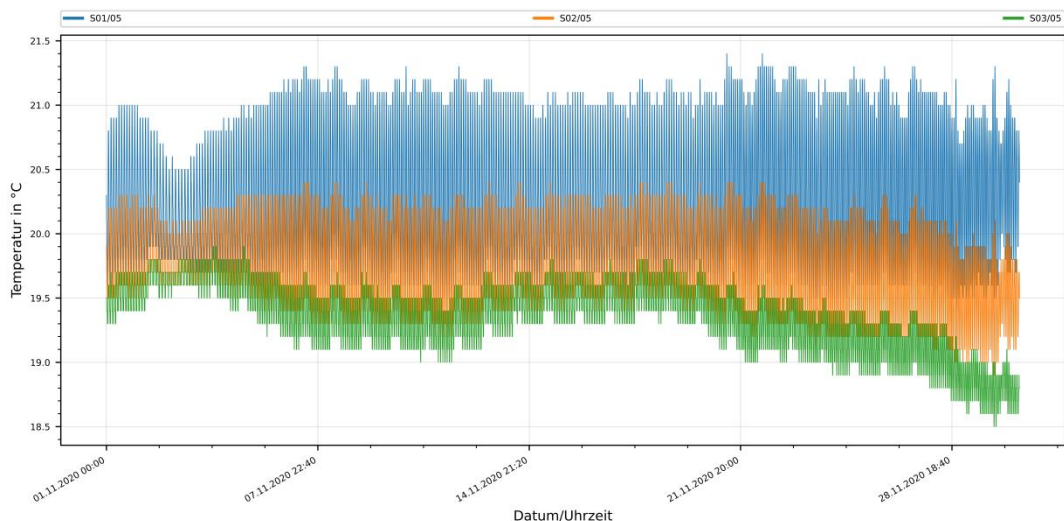


Abbildung 91: Vertikaler Temperaturverlauf Raummitte Schlafzimmer Reihe 5

Im Fensterbereich lässt sich eine deutliche Temperaturdifferenz im Fußbereich auch im Wohnzimmer (mit Außenwandaktivierung) feststellen. Abbildung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**92 zeigt die Temperaturverläufe aller Datenlogger auf 1,3 m Höhe im Wohnzimmer. Der Messpunkt M02/02 vor dem Fenster zeigt die

geringsten Temperaturen. Die Peaks sind durch direkte Sonneneinstrahlung zu erklären. Die wärmsten Temperaturen zeigen die Sensoren unmittelbar vor der aktivierten Außenwand (M02/01 und M02/03).

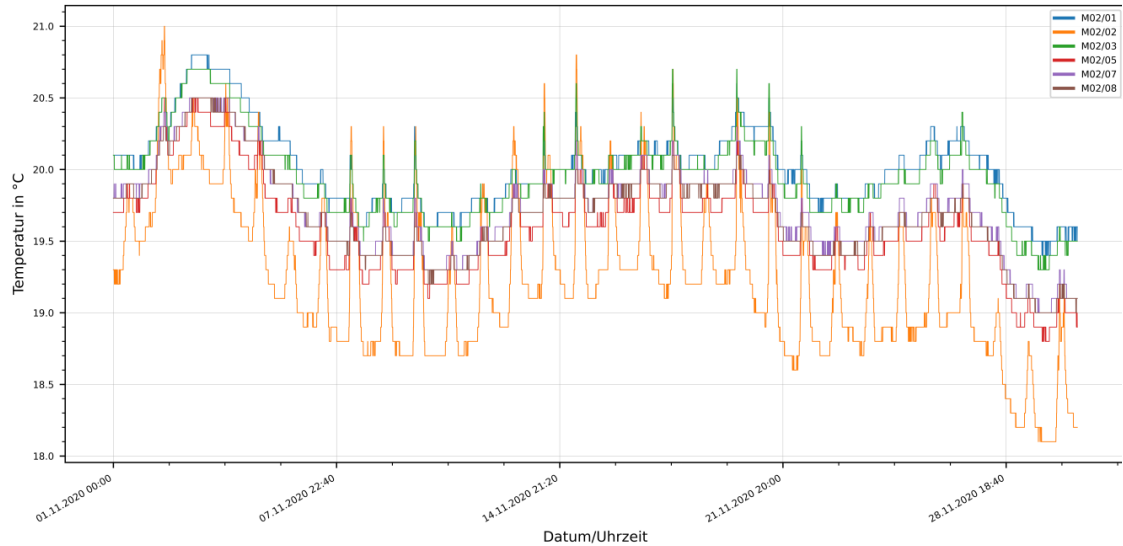


Abbildung 92: Temperaturverläufe in der mittleren Ebene im Wohnzimmer (Ebene 2)

Abbildung 93 zeigt die Ebene 2 im Schlafzimmer. Hier liegen die kältesten Temperaturen an den Punkten M02/02 und M02/04, 0,3 m und 1 m vor der Außenwand.

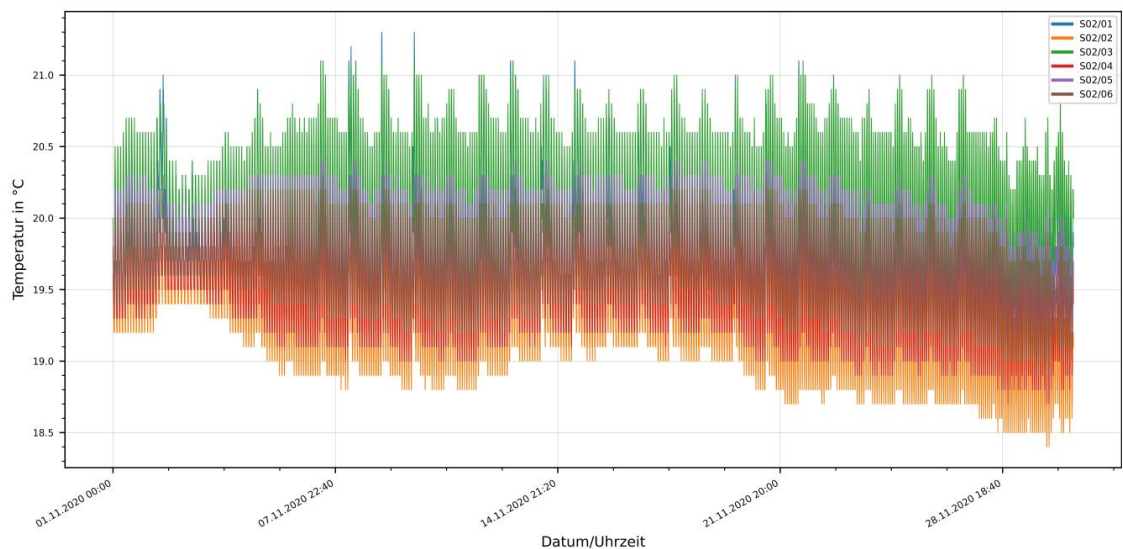


Abbildung 93: Temperaturverläufe in der mittleren Ebene im Schlafzimmer (Ebene 2)

Am 10.02.2021 erfolgte eine Zwischenauslesung der Messdaten. Hierbei wurde der Monat Januar als Auswertungsmonat gewählt, welche die Situation mit ausgetauschten Fenstern darstellt. Abbildung 94 und Abbildung 95 zeigt die Temperaturverläufe der Messsäule R2 (MXX/02) im Raum mit temperierter Außenwand im Monat November 2020 beziehungsweise Januar 2021. Der vertikale Temperaturunterschied ist im Monat November 2020 mit den alten Fenstern größer als im Januar 2021 mit den neuen energieeffizienteren Fenstern.

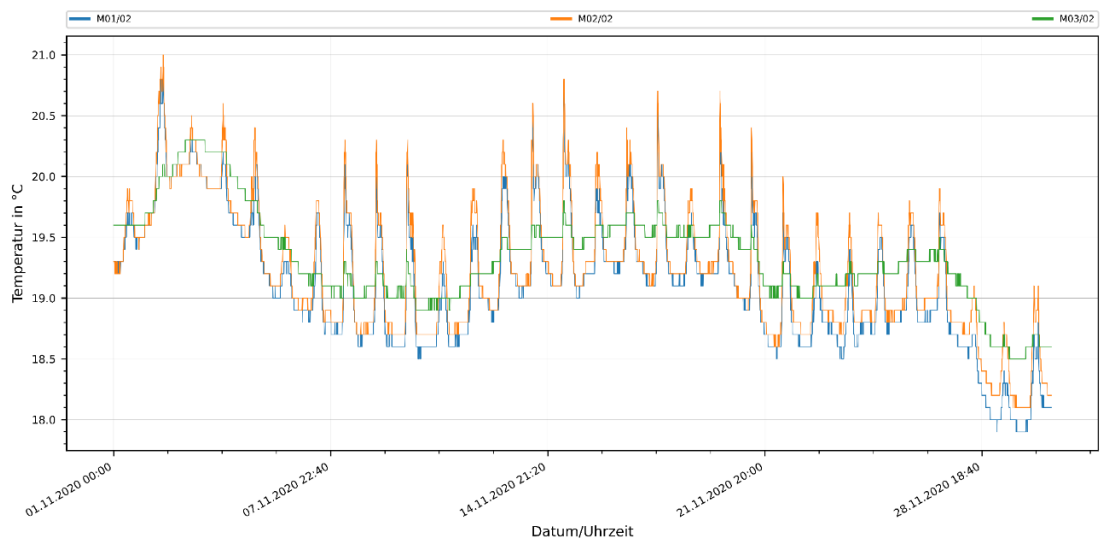


Abbildung 94: Temperaturverläufe Messsäule R2 (MXX/02) im Raum mit temperierter Außenwand November 2020

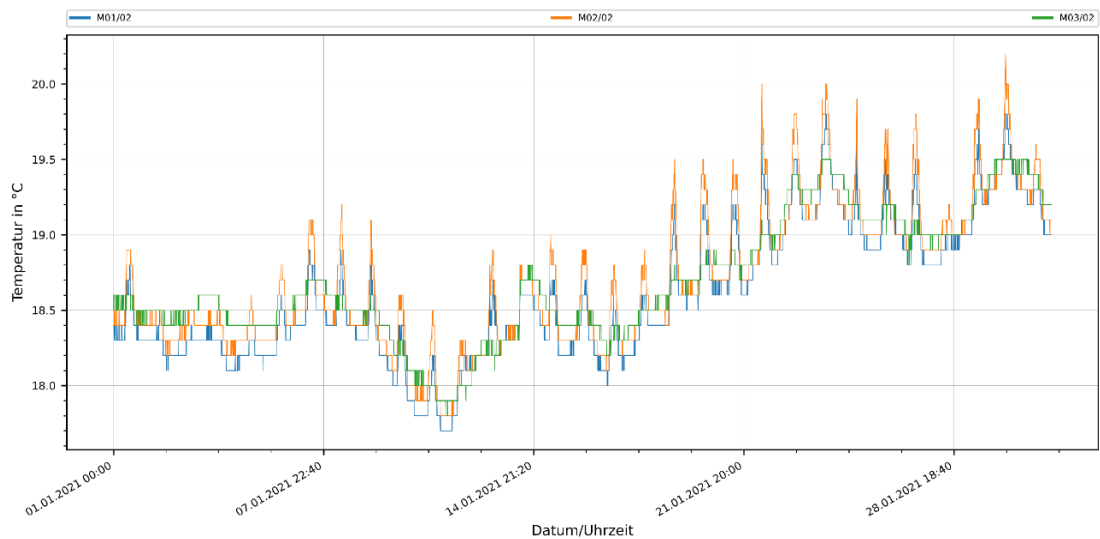


Abbildung 95: Temperaturverläufe Messsäule R2 (MXX/02) im Raum mit temperierter Außenwand Januar 2021

Abbildung 96 zeigt einen detaillierteren Bereich der Temperaturverläufe im Schlafzimmer für den Tag 21.01.2021. Dadurch lassen sich die Verläufe und Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages besser nachvollziehen. **Abbildung 85: Darstellung der Verteilung der im Mittel gemessenen Temperaturen auf der mittleren Messebene (Ebene 2) des Monats März 2020 im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts)**

Abbildung 97 zeigt die Verteilung der gemessenen Temperaturen im Wohnzimmer und im Schlafzimmer für den Monat Januar 2021. Die Farbe Blau stellt dabei die kälteste Temperatur und Rot die wärmste Temperatur dar. Man sieht im Wohnzimmer eine homogene Temperaturverteilung mit wärmeren Bereichen in der Nähe der thermisch aktivierten Außenwand und einem kälteren Bereich im Fensterbereich. Im Schlafzimmer erscheint die Temperaturverteilung inhomogener mit den wärmsten Bereichen in Heizkörnernähe und den kältesten Bereichen in Außenwandnähe und in Nähe der gegenüberliegenden Wand zum Eingangsflur. Im Januar 2021 betrug die mittlere Außenlufttemperatur nach Außenluftsensor der Heizungsregelung 2,89 °C und nach Messwerten des Deutschen Wetterdienstes für den Standort München-Stadt 0,40 °C.

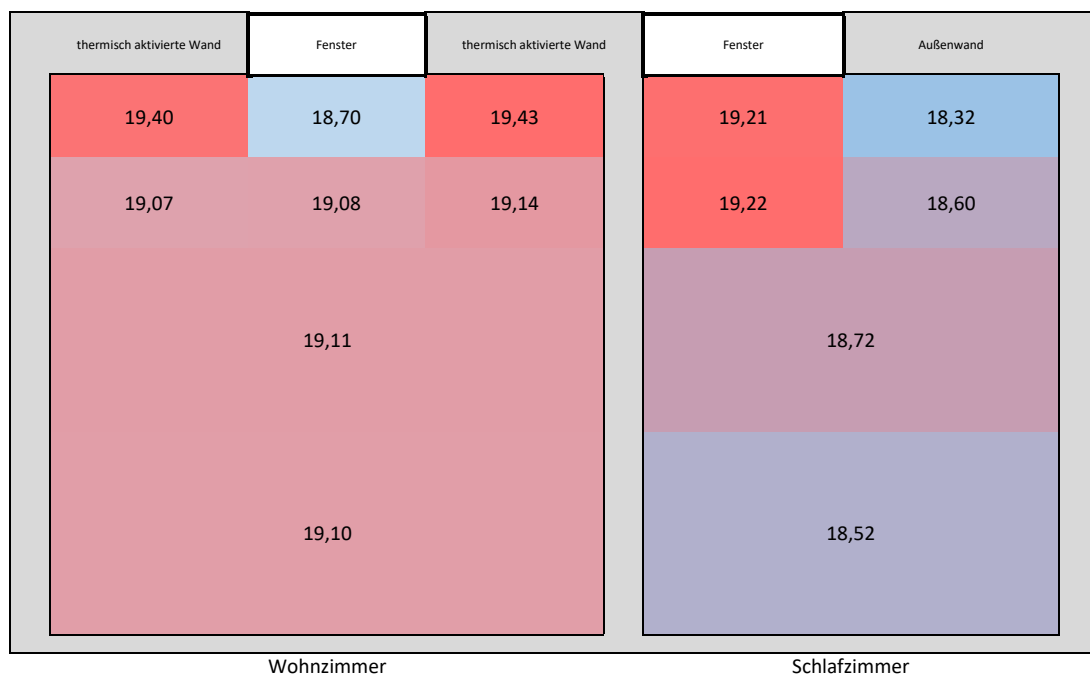


Abbildung 96: Darstellung der Verteilung der im Mittel gemessenen Temperaturen auf der mittleren Messebene (Ebene 2, 1,3 m vom Fußboden) des Monats Januar 2021 im Wohnzimmer (links) und im Schlafzimmer (rechts)

Abbildung 98 zeigt die Temperaturverläufe der beiden Heizkreise, die Außenlufttemperatur und die Raumlufttemperaturen der beiden Räume für die gesamte Heizperiode 2020/21, beziehungsweise vom 28.09.2020 (Anfang der kalten Temperaturen) bis 20.04.2021 (Zeitpunkt der letzten Auslesung).

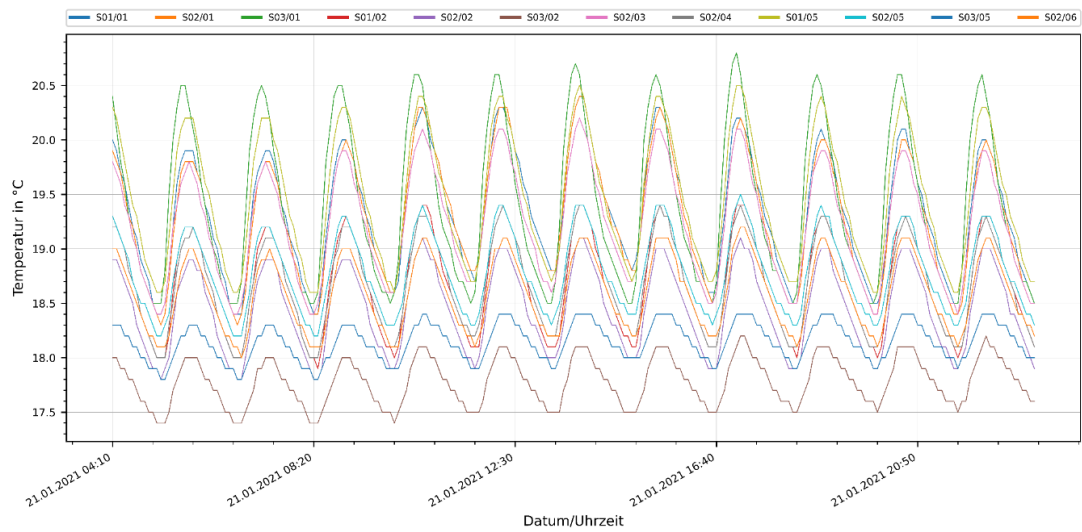


Abbildung 97: Temperaturverläufe aller im Raum mit Heizkörper befindlichen Datenlogger am 21. Januar 2021

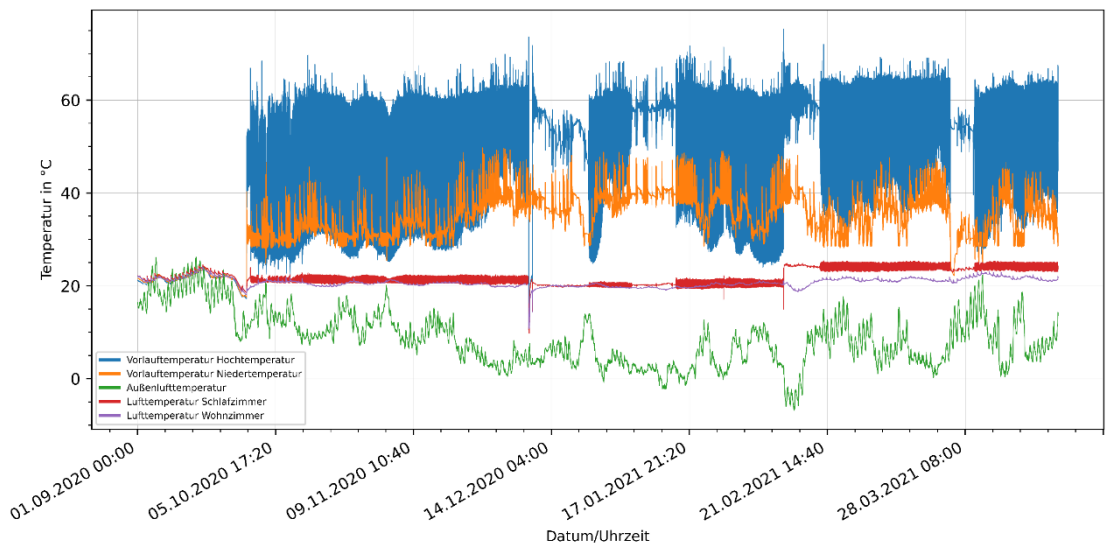


Abbildung 98: Temperaturverläufe gesamte Heizperiode 2020/21

Tabelle 29 zeigt die Ergebnistabelle der Heizperiode 2020/21. Da der Volumensensor des Hochtemperaturkreises keine Werte aufzeichnete, musste ein konstanter Volumenstrom angenommen werden. Bei 20 l/h lässt sich folgender Plot für die Leistungsverläufe erstellen. Dieser angenommene Volumenstrom liegt auch der Ergebnistabelle zu Grunde.

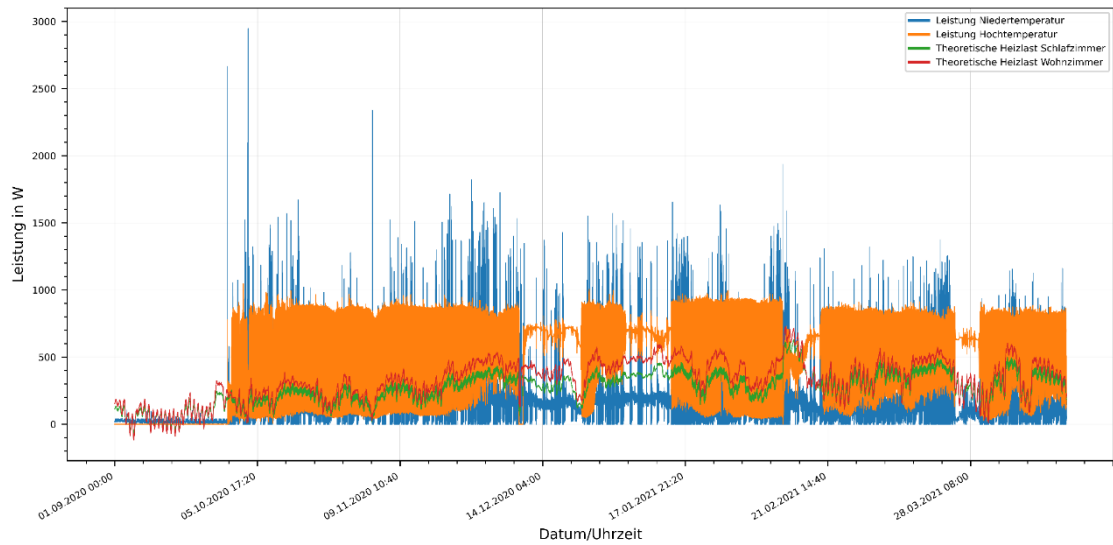
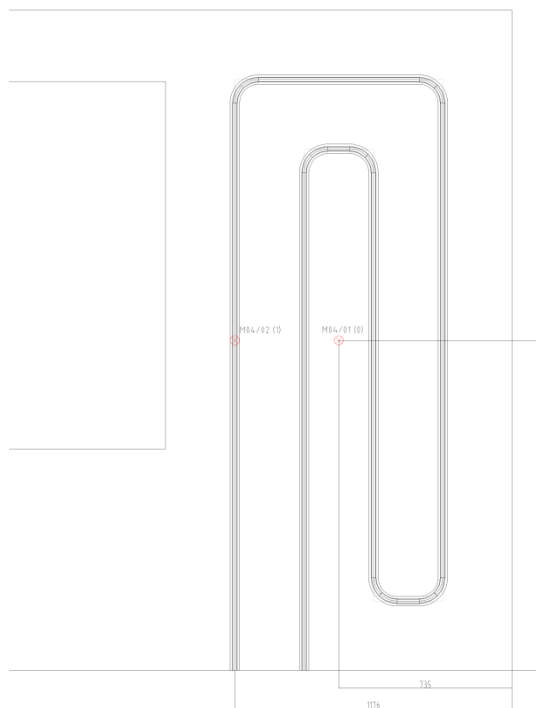


Abbildung 99: Leistungsverläufe für die Heizperiode 2020/21

Tabelle 29: Ergebnistabelle gesamte Heizperiode 2020/21

		Wohnzimmer				Schlafzimmer	
		Zeitraum 28.09.2020 bis 20.04.2020				Zeitraum 28.09.2020 bis 20.04.2020	
Wärmemenge	Einheit	Niedertemperatur (Wohnzimmer)	Berechnete Wärmeabgabe der Rohre im Wohnzimmer	Niedertemperatur mit Wärmeabgabe der Rohre	Theoretischer Energiebedarf basierend auf den Temperaturen	Hochtemperatur (Schlafzimmer)	Theoretischer Energiebedarf basierend auf den Temperaturen
Berechnung mit Temperatur-/Volumenstrommesswerten	kWh	725,7	286,7	1012,4	1786,5	2155,9	1435,1
flächenspezifisch	kWh/m ²	37,7	14,9	52,6	92,7	160,9	107,1

Abbildung 100 zeigt die Verläufe einiger Oberflächentempersensoren im Dezember 2020 nach dem Austausch der Fenster, um unter anderem die Temperaturverteilung der Thermografie-Aufnahmen an definierten Stellen mit Messwerten zu konkretisieren. Die Messpunkte sind folgendermaßen definiert und die Messpunkte im Wohnzimmer anhand der Skizze (s. Abbildung 100) zu erkennen.



- M04/01 Wohnzimmer (Außenwandtemperierung),
Innenseite Außenwand zwischen zwei
Heizleitungen
- M04/02 Wohnzimmer (Außenwandtemperierung),
Innenseite Außenwand auf Heizleitung
- M04/03 Wohnzimmer (Außenwandtemperierung),
Innenwand zur Nachbarwohnung
- M04/04 Schlafzimmer, Innenseite Außenwand
mittig
- M04/05 Schlafzimmer, Innenseite Außenwand
mittig hinter dem Heizkörper

Abbildung 100: Skizze der Messpunkte an der Außenwand (Wohnzimmer)

Der Messpunkt an der Außenwand im Wohnzimmer M04/02, unter welchem eine Heizleitung verläuft, zeigt mit durchschnittlich 26 °C die höchsten Temperaturen. Der Messpunkt M04/05 an der Außenwand im Schlafzimmer hinter dem Heizkörper zeigt zunächst eine sehr hohe Temperatur, danach fällt diese stetig bis etwa 18 °C. Das hat vermutlich die Ursache, dass der Austausch der Fenster dazu beitrug, dass die Wärme besser im Raum gehalten werden kann, wodurch das Thermostatventil lange Zeit geschlossen bleibt und der Heizkörper nicht sehr heiß wird, da auch die Außenlufttemperaturen nicht extrem niedrig waren. Zwischen zwei Heizleitungen (M04/01) beträgt die Temperatur an der raumseitigen Oberfläche im Messzeitraum 20 °C bis 21 °C. Am Messpunkt an der Innenwand zur Nachbarwohnung liegt die Temperatur leicht über 19 °C. Die Temperaturen am Messpunkt an der Außenwand im Schlafzimmer liegen unterhalb 17 °C.

Die Messwerte für die Außenlufttemperatur wurden mit aufgezeichneten Daten des Deutschen Wetterdienstes (10-Minuten Werte) für München-Stadt verglichen, da sich der Außenluftfühler an der Hauswand befindet, wodurch dieser etwas höhere Temperaturen aufzeichnet als in freier Umgebung. In der Zeit vom 01.09.2020 und 20.04.2021 lag die zeitlich gemittelte Temperatur-Differenz bei knapp 2,5 K

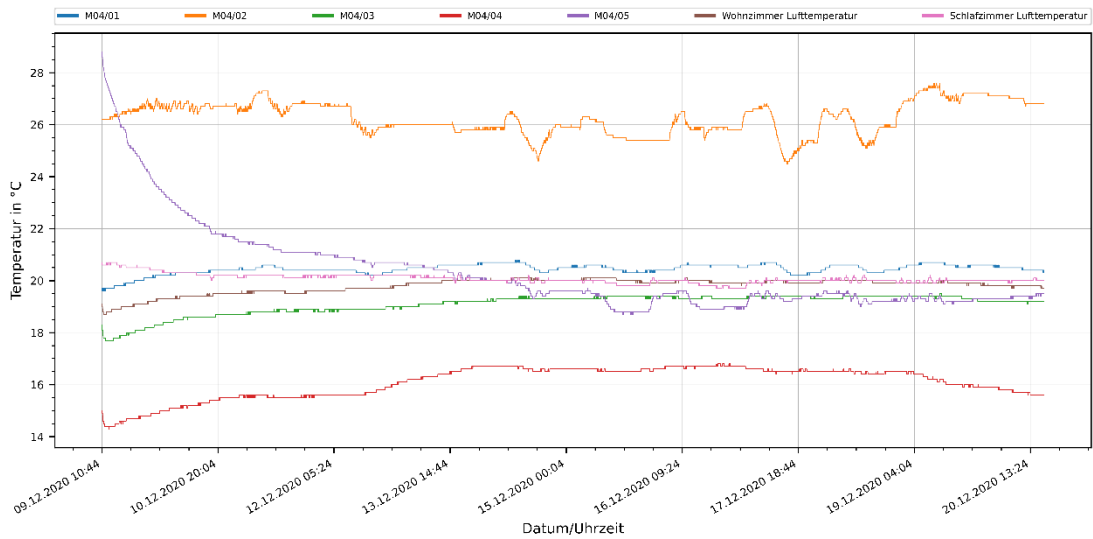


Abbildung 101: Wandoberflächentemperaturen mit Lufttemperaturen im Versuchsraum

Abbildung 102 zeigt den Verlauf der Außenlufttemperatur (Werte des DWD und Außensensor Regelung). Die kälteste Periode wurde zwischen dem 11.02.2021 und dem 14.02.2021 erreicht. Hier lagen die Temperatur unter -10 °C und die minimale gemessene Temperatur ($-11,2\text{ °C}$) wurde am 13.02.2021 gegen 6:00 Uhr erreicht.

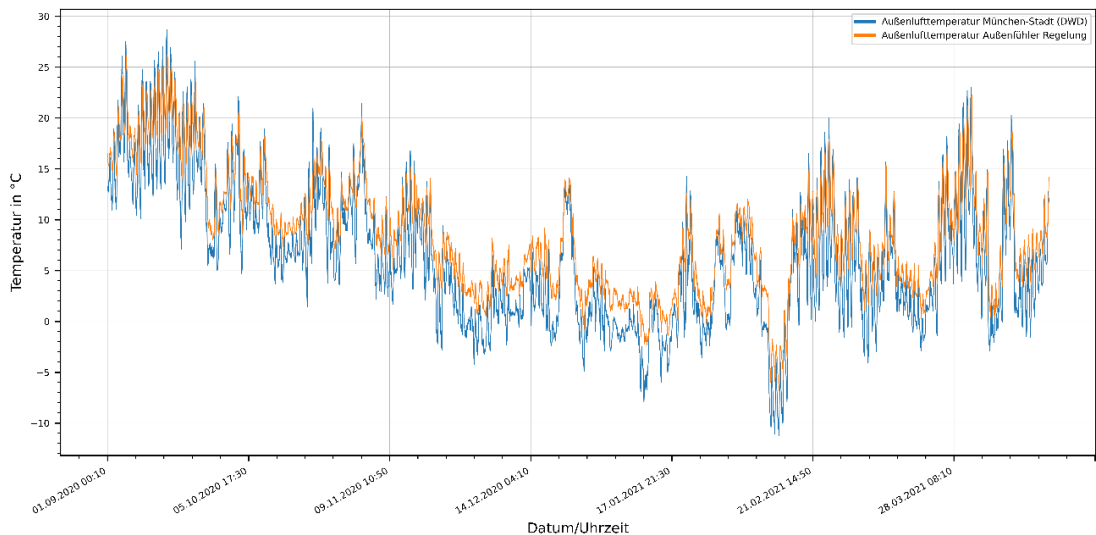


Abbildung 102: Vergleich der gemessenen Außenlufttemperatur mit den Messdaten vom DWD

7.3 Behaglichkeitsmessung

Für die Messung der Behaglichkeit wurden Globe-Sensoren raummittig installiert, welche die Strahlungstemperaturen im Raum messen. Die Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgte mittels eines Hitzdrahtanemometers. Die erste subjektive Feststellung bei Begehung des Wohnzimmers mit thermisch aktivierter Außenwand war ein angenehmes Raumklima bei normalem Bekleidungsgrad (lange Hose, Schuhe, T-Shirt). Der Referenzraum mit konventionellem Heizkörper wurde eher als zu warm empfunden.

Für die Messung der Luftgeschwindigkeit wurden ausgewählte Messpunkte des Temperatur-Messrasters verwendet. Eine höhere Luftgeschwindigkeit als 0,01 m/s wurde nicht erreicht. Abbildung 103 zeigt das verwendete Hitzdrahtanemometer. Bei der Luftgeschwindigkeitsmessung darf das Hitzdrahtanemometer nicht in der Hand gehalten werden. Da so die eigenen Handbewegungen mitgemessen werden würden.



Abbildung 103: Luftgeschwindigkeitsmessung mit Hitzdrahtanemometer

Tabelle 30 zeigt Messwerte vom 27.02.2020. Geschwindigkeiten größer als 0,01 m/s werden nicht gemessen.

Tabelle 30: Messwerte 27.02.2020 Luftgeschwindigkeit

Uhrzeit	Raum	Messpunkt	Mittelungsdauer	Luftgeschwindigkeit
09:10	WZ	(M 02/01) L1	1 min.	0,00 m/s
09:20	WZ	(M 03/02) L2	1 min.	0,01 m/s
09:30	WZ	(M 03/03) L3	1 min.	0,01 m/s
09:40	WZ	(M03/01) L4	1 min.	0,01 m/s
09:55	WZ	(M02/08) L5	1 min.	0,00 m/s
10:20	SZ	L6	1 min.	0,01 m/s

Für die Messung der mittleren Strahlungstemperatur wurden Globe-Sensoren verwendet. Dafür wurden zunächst zwei in etwa der gleichen Höhe positioniert, um zu überprüfen,

ob sie den gleichen Messwert ausgeben, was der Fall war. Dann wurden die Globe-Sensoren raummittig in den beiden Räumen installiert.

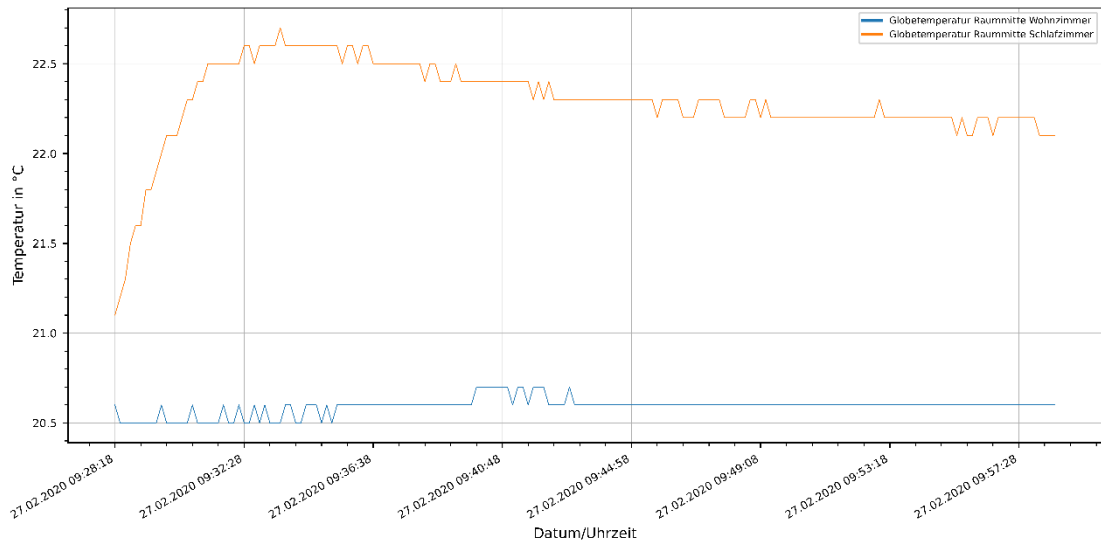


Abbildung 104: Verlauf Globetemperaturen raummittig Wohn- und Schlafzimmer

Dabei stellen sich die in der Tabelle 31 abgebildeten Temperaturen ein. Außerdem sind die Lufttemperaturen, die von den Datenloggern erfasst wurden, abgebildet. Festzustellen ist, dass die Globetemperatur im Wohnzimmer um 0,2 K über der Lufttemperatur liegt und die Globetemperatur im Schlafzimmer 0,1 K unterhalb der Lufttemperatur liegt, was durch den Strahlungsanteil der kalten Außenwand, bzw. der warmen Außenwand im Wohnzimmer zu erklären ist.

Tabelle 31: Messwerte Luft-/Globetemperaturen 27.02.2020, 10:00 Uhr

Globetemperatur Wohnzimmer	Lufttemperatur Wohnzimmer	Rel. Luftfeuchtigkeit Wohnzimmer	Globetemperatur Schlafzimmer	Lufttemperatur Schlafzimmer	Rel. Luftfeuchtigkeit Schlafzimmer	Außenlufttemperatur
20,6 °C	20,4 °C	29,7 %	22,1 °C	22,2 °C	26,6 %	6,8 °C

Nach Gleichung 1 (s. Abschnitt 4.5) aus DIN EN ISO 7730 ergibt sich unter der Annahme eines Bekleidungsindex von 1,0 clo (typische Ankleidung im Winter), eines Aktivitätsgrades von 1,0 met (Sitzen lesend) und einer gemessenen Luftgeschwindigkeit von 0,01 m/s im Wohnzimmer ein PMV-Behaglichkeitsindex von -0,82 (also eher zu kühl), bzw. ein vorhergesagter Prozentsatz an Unzufriedenen von 19 % Prozent (PPD). Im Schlafzimmer ergibt sich ein PMV-Wert von -0,44, bzw. ein PPD-Wert von 9 %.

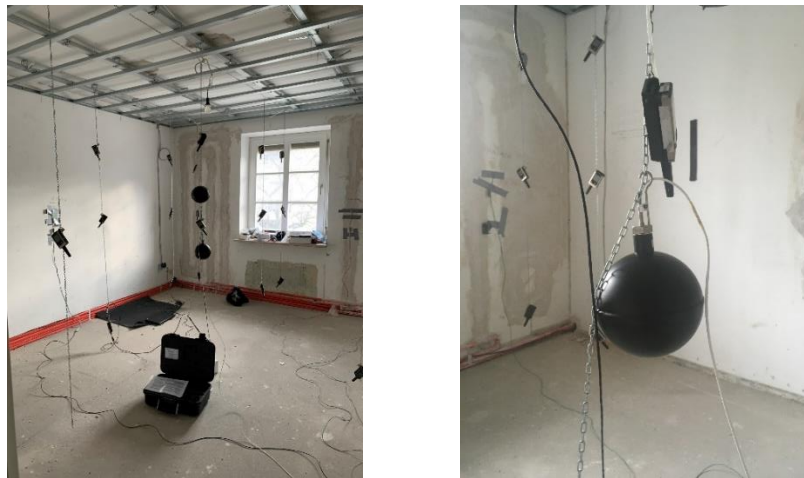


Abbildung 105: Versuchsraum mit Globesensoren in Raummitte

Eine Zweite Messung am 10.02.2021 zeigt folgende Werte für die Raummitte:

Tabelle 31: Messwerte Luft-/Globetemperatur 10.02.2021, 15:30 Uhr

Globetemperatur Wohnzimmer	Lufttemperatur Wohnzimmer	Rel. Luftfeuchtigkeit Wohnzimmer	Globetemperatur Schlafzimmer	Lufttemperatur Schlafzimmer	Rel. Luftfeuchtigkeit Schlafzimmer	Außenlufttemperatur
20,2	20,0	35,5 %	21,9	21,8	31,4 %	2,3

Hierbei ergeben sich nach DIN EN ISO 7730 folgende Werte:

Wohnzimmer: PMV = -0,89 / PPD = 22 %

Schlafzimmer: PMV = -0,46 / PPD = 9 %

Abbildung 106 zeigt den Messverlauf vom Globe-Sensor (Strahlungstemperatur) und dem Datenlogger (Lufttemperatur) raummittig zwischen dem 09.12.2020 und 20.12.2020. Die Strahlungstemperatur liegt im Schnitt etwa um 0,3 K über der Lufttemperatur, was den Einfluss der thermisch aktivierten Außenwand verdeutlicht. Am 09.12.2020 erfolgte der Austausch der Fenster, weshalb die Temperaturen ab dem 09.12.2020 langsam ansteigen. Zusätzlich ist der Verlauf der Außenlufttemperatur abgebildet. Man sieht, dass Temperaturschwankungen der Außenluft die Raumluft- und Strahlungstemperatur nur im geringen Maße beeinflussen und eine konstante Temperatur von etwa 19 °C erreicht wird.

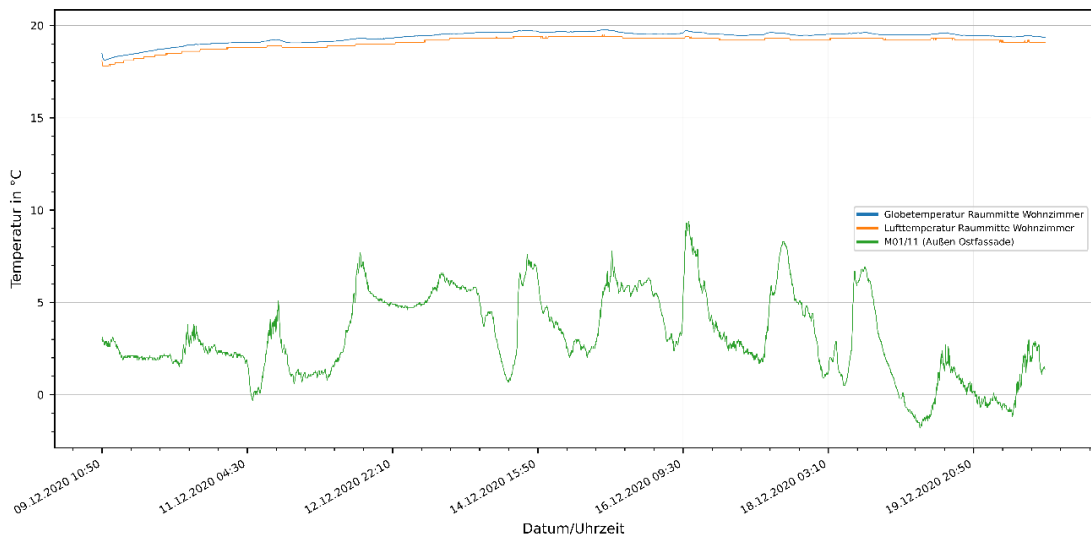


Abbildung 106: Vergleich Lufttemperatur (Datenlogger) mit Strahlungstemperatur mit Außenlufttemperatur

7.4 Thermografie-Aufnahmen

Erste Thermografie-Aufnahmen vom 21.01.2020 von außen (s. Abbildung 107) zeigen einen 31hohen lokalen Wärmeverlust im Bereich des Heizkörpers. Die oberen Fenster sind die der Referenzwohnung (rechts: Außenwandaktivierung, links: Heizkörper). Die kaum erhöhte Temperatur im Bereich der Außenwandaktivierung lag zu diesem Zeitpunkt an der falschen Einstellung in der Regelung. Dieser Fehler, welcher zu einer Vorlauftemperatur von nur 20 °C führte, wurde am 06.03.2020 behoben.

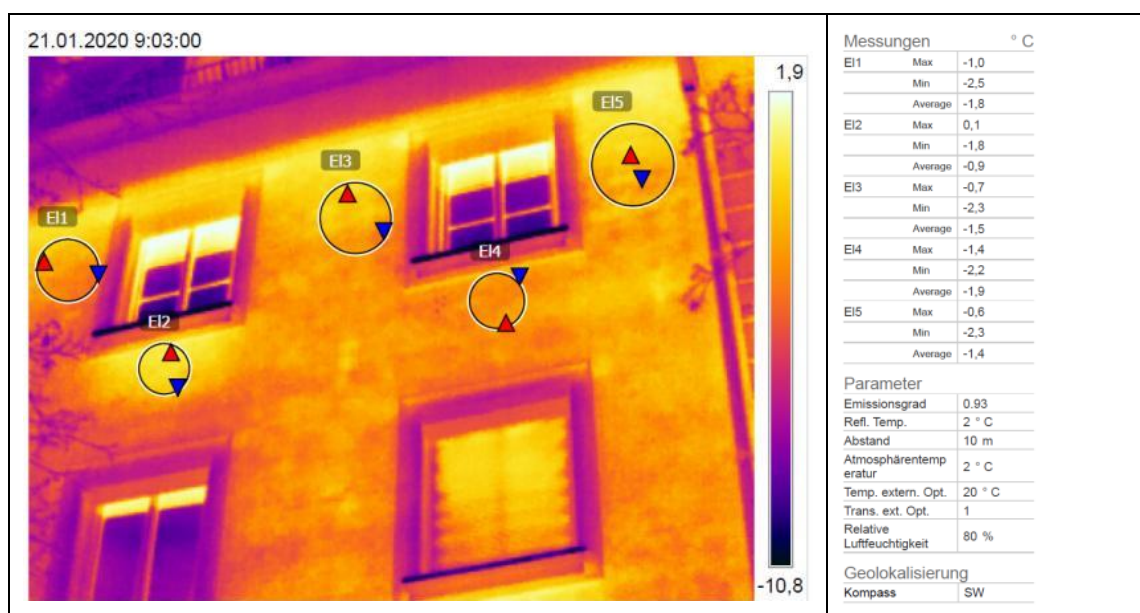


Abbildung 107: Thermografie-Aufnahme (links: konventionell beheizter Referenzraum, rechts: Außenwandaktivierung)

Abbildung 108 zeigt erste Thermografie-Aufnahmen von innen (21.01.2020, 09:10 Uhr). Zu diesem Zeitpunkt betrug die Vorlauftemperatur noch etwa 20 °C (wegen dem Regelungsfehler).

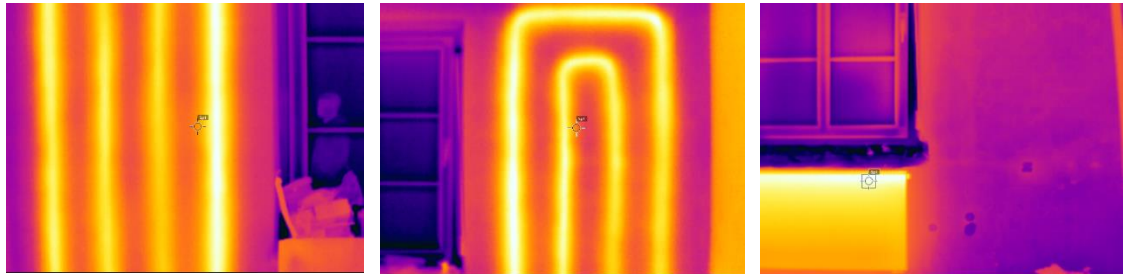


Abbildung 108: Thermografie-Aufnahme Wohnzimmer Außenwand (innen, linke Fläche vom Fenster); Thermografie-Aufnahme Wohnzimmer Außenwand (innen, linke Fläche vom Fenster); Thermografie-Aufnahme Schlafzimmer Außenwand (innen)

Abbildung 109 zeigt eine weitere Thermografie-Aufnahme von außen vom 15.02.2021 (06:36 Uhr). Zu diesem Zeitpunkt betrug die Außenlufttemperatur etwa -8 °C. Die Ellipsen stellen Flächenmittlungen der Oberflächentemperatur dar. Der Brüstungsbereich des Schlafzimmers (E14) weist mit -7,8 °C die höchste Temperatur auf. Fast die gleiche Temperatur haben die Bereiche der Außenwandaktivieren (EL1 und E12). Bereiche der Außenwand ohne Heizkörper oder integrierte Heizleitungen zeigen eine Temperatur von -8,5 bis -8,7 °C (E13, E15 und E16).

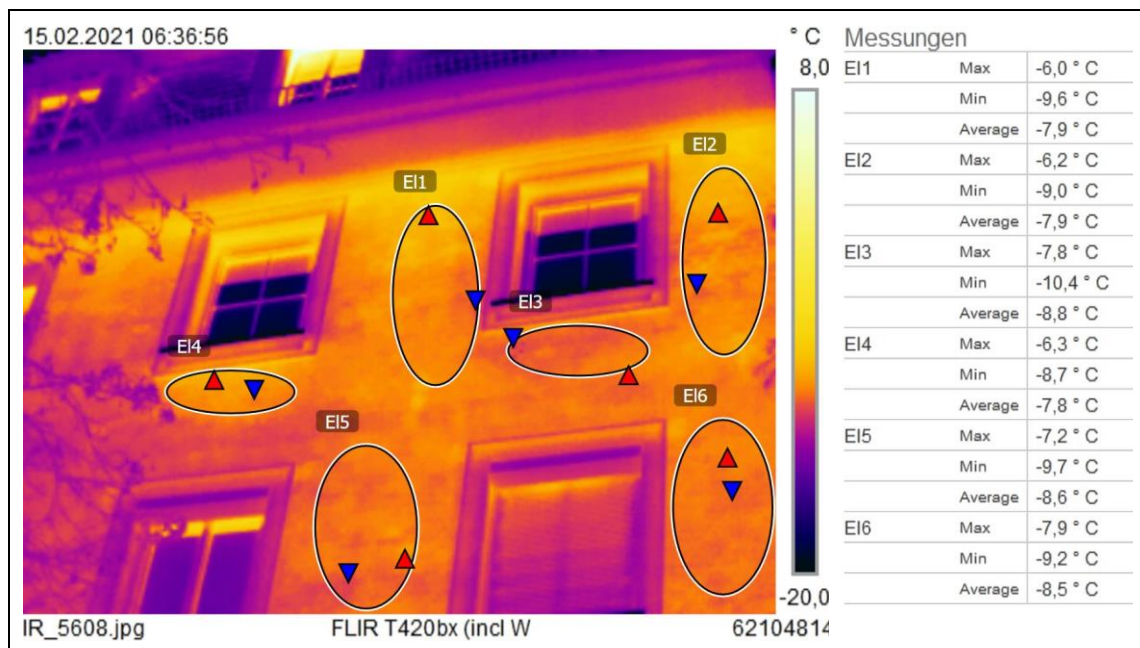


Abbildung 109: Thermografie-Aufnahme der Außenfassade 15.02.2021

Die Thermografie-Aufnahmen von Innen vom 15.02.2021 zeigt die Abbildung 110. Durch flächengemittelte Oberflächentemperatur des Heizkörpers beträgt 49 °C (Bx1). Die zwei Mittelungsflächen Bx2 und Bx3 auf der Außenwand zeigen gemittelte Temperaturwerte von 16,3 °C und 17,0 °C.

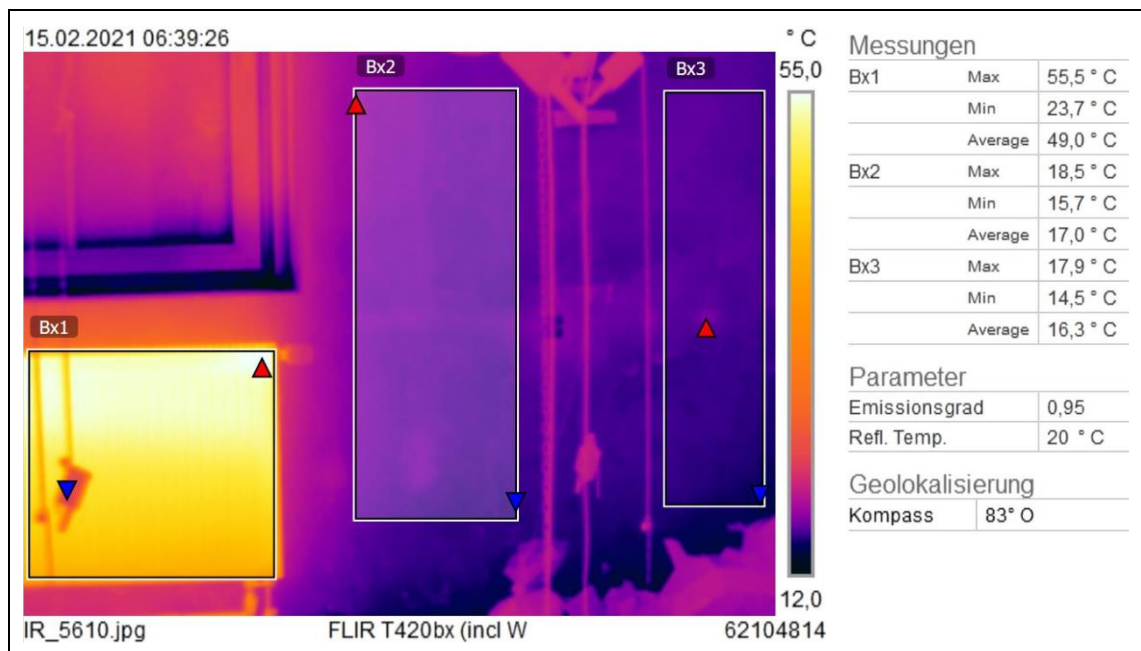


Abbildung 110: Thermografie-Aufnahme der Außenwand von Innen (Schlafzimmer) 15.02.2021

Die Abbildung 111 zeigt die Ansicht der Außenwand mit den Heizleitungen im Wohnzimmer. Messpunkt Sp2 liegt auf dem Verlauf einer Leitung und zeigt mit 24,8 °C die höchste Temperatur. Sp1 liegt zwischen zwei Leitungen, dort wird eine Temperatur von 18,5 °C gemessen. Die mittlere Temperatur der zu sehende Fläche liegt bei 20,1 °C.

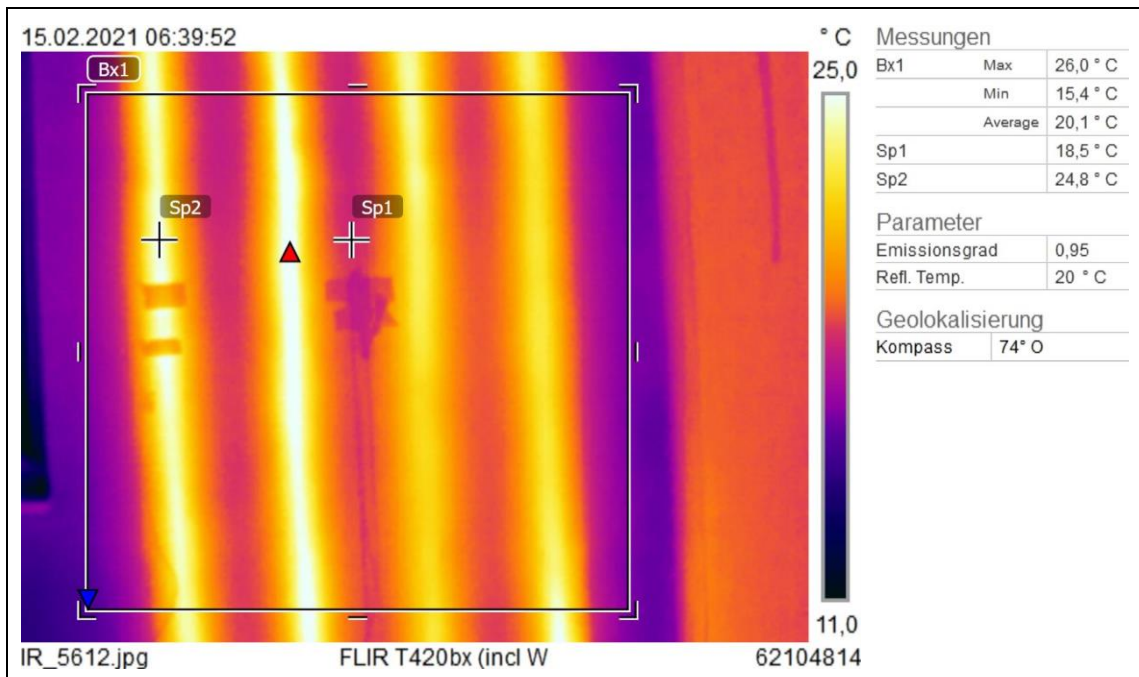


Abbildung 111: Thermografie-Aufnahme der Außenwand von Innen (Wohnzimmer) 15.02.2021

8 Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung (IREES)

Mit Unterstützung der Verwaltung der *Postbaugenossenschaft München und Oberbayern eG* (im Folgenden *pbtm* benannt) wurden Haushalte identifiziert, die repräsentativ für die verschiedenen Wohngrößen sowie demografischen Merkmale der Bewohnerschaft im Renatablock sind. 21 Haushalte wurden schriftlich bezüglich einer Teilnahmebereitschaft schriftlich für ein Interview angefragt. Personen aus 11 Haushalten sagten eine Teilnahme und Genehmigung zur Kontaktaufnahme zu. Eine Person konnte für eine Terminvereinbarung nicht erreicht werden. Insgesamt wurden 12 Personen aus 10 Haushalten interviewt (s. Tabelle 32). Die Altersgruppen sind dabei relativ ausgewogen repräsentiert. Doppelt so viele Frauen wie Männer nahmen an den Interviews teil.

Tabelle 32: Beschreibung der Stichprobe

Geschlecht	Altersgruppen						n
	≤ 35 Jahre	36 bis 45 Jahre	46 bis 55 Jahre	56 bis 65 Jahre	66 bis 75 Jahre	≥ 76 Jahre	
w	1	2	2	1	2	0	8
m	0	2	1	0	1	0	4

Die Haushalte repräsentierten unterschiedliche Wohnungsgrößen (s. Tabelle 33). Zahlenmäßig überwogen Wohneinheiten mit 71 bis 99 qm Größe.

Tabelle 33: Wohnungsgrößen der befragten Haushalte

Wohnungsgröße			
≤ 55qm	56 bis 70 qm	71 bis 99 qm	≥ 100 qm
2	3	4	1

Die Interviews fanden im Zeitraum vom 02. bis 12. März 2020 statt. Es wurde ein teilstrukturierter Interview-Leitfaden eingesetzt. Für ein besseres Verständnis der Wandtemperierung und der Wirkung auf den thermischen Komfort wurde nach den ersten 5 Interviews eine Visualisierungs-Vorlage eingesetzt.

Neun Interviews erfolgten in der jeweiligen Wohnung der Haushalte, eine Befragung wurde aus Krankheitsgründen des Ehepartners in einem Besprechungsraum der Verwaltung der *pbtm* durchgeführt. Die zeitliche Länge der Interviews variierte zwischen 30 bis 57 Minuten; die durchschnittliche Dauer betrug 48 Minuten. Mit Einverständnis der Bewohnenden erfolgte eine Aufzeichnung mittels Audio-Recorder. Ergänzend wurden mit dem Einverständnis der Mieterinnen und Mieter Fotos von exemplarischen Räumen bzw. Raumdetails gemacht.

Neben Angaben zum Nutzungsprofil (z.B. Anwesenheitszeiten in der Wohnung) wurden im Interview die folgenden Aspekte thematisiert:

- Zufriedenheit mit der Wohnung allgemein (z.B. Mietdauer, Gründe für Wahl der pbtm)
- Zufriedenheit mit dem Raumklima (z.B. Raumtemperatur, Einfluss auf Raumtemperatur, Luftqualität)
- Lüftungsverhalten
- Vorteile und Nachteile einer Umstellung der Wärmeversorgung auf eine Grundtemperierung
- Bedarfe bezüglich der konkreten Umsetzung des Sanierungsvorhabens (z.B. Fragen zu Bedürfnissen wie Verbleib oder temporärer anderweitiger Unterbringung, Bedarfe vor, während, nach der Sanierung, Kommunikation/Informationsbedarf, praktische Hilfen)

In Ergänzung des qualitativen Interview-Teils wurden die Befragten abschließend um ihre Einstufungen zu folgenden Aspekten gebeten:

- Zufriedenheit mit der erzielbaren Raumtemperatur durch die jetzige Heizung,
- Zufriedenheit mit der Bedienung der jetzigen Heizung sowie
- Zufriedenheit mit der Wohnung insgesamt.

Die Erhebung erfolgte standardisiert nach Nennung des jeweiligen Aspektes durch die Interviewerin anhand einer schriftlichen Vorlage (s. Abbildung 112) und gewählter Zufriedenheitseinstufung per Fingerzeig durch die interviewte Person.

Wie zufrieden bzw. unzufrieden sind Sie mit

...

zufrieden	eher zufrieden	weder noch	eher unzufrieden	unzufrieden
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 112: Vorlage zur Einstufung der Zufriedenheit

Die Auswertung der Audiodateien der einzelnen Interviews erfolgte mittels der Software MAXQDA¹⁰. Den Audiofiles wurden thematische Kategorien (Codes) und Unterkategorien (Subcodes) zugewiesen.

8.1 Themen der Interviews

Anhand einer Wortwolke lässt sich erkennen, welche Kategorien besonders intensiv von den Interviewten erörtert wurden. Häufigkeit und Relevanz der verwendeten Begriffe bestimmen die Größe der abgebildeten Wörter.



Abbildung 113: Wortwolke zu den analysierten Audiofiles

Das beherrschende Thema war der thermische Komfort im Winter, hierzu zählt auch der individuelle Einfluss auf die Raumtemperatur. Informations- und Kommunikationsbedarf wurde im Zusammenhang mit der Sanierung häufig angesprochen, beispielsweise auch konkrete Fragen zum Verbleib in der Wohnung während der Sanierung.

8.2 Entwicklung eines Kategoriensystems

Im Rahmen einer detaillierten Analyse wurde ein Kategorienschema entwickelt. Als übergeordnete Codes wurden 5 Themen abgeleitet (s. Abbildung 114). Das Spektrum reicht vom Sanierungskonzept als solches über spezifische technisch-bauphysikalisch relevante Aspekte, die vor allem im Zusammenhang mit der Auswirkung auf das Raumklima und dem Wohnkomfort angesprochen wurden. Von großer Wichtigkeit war für die

¹⁰ MAXQDA ist eine Software der Firma VERBI zur computergestützten qualitativen Daten- und Textanalyse (<https://www.maxqda.de/>).

Befragten der konkrete Sanierungsablauf in Hinblick auf Konsequenzen für den Wohnalltag.

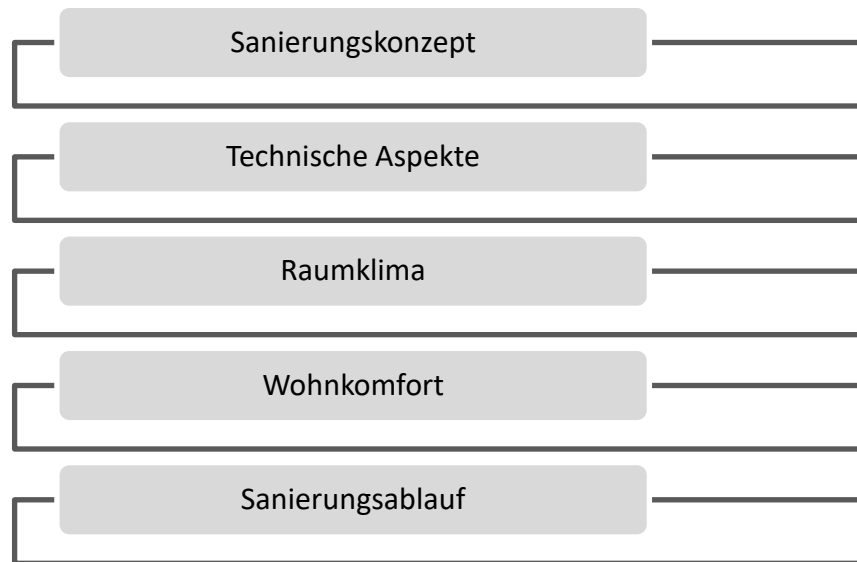


Abbildung 114: Abgeleitete Hauptkategorien aus den Interviewtranskripten

8.2.1 Sanierungskonzept

Die Kategorie unterteilt sich auf die Themen Umwelt, Skepsis, Behaglichkeit, ökonomische Aspekte und Partizipation, die in der Tabelle 34 nach der Häufigkeit ihrer Nennungen absteigend aufgeführt sind.

Tabelle 34: Subcodes zur Kategorie Sanierungskonzept

Subcodes	Anzahl der Nennungen
Umwelt	18
Skepsis	12
Behaglichkeit	9
Ökonomische Aspekte	7
Partizipation	5

In Hinblick auf den Umweltaspekt begrüßten die Befragten einhellig grundsätzlich die Intention der *bptm*, mit diesem Sanierungskonzept den Renatablock sozial verträglich instandzusetzen¹¹, zu modernisieren und damit gleichzeitig Klimaziele zu unterstützen. Es besteht grundsätzlich Vertrauen in die Aktivitäten der *bptm*. Die Durchführung von Interviews im Vorfeld der geplanten Sanierung stieß auf positive Resonanz und wurde als Wertschätzung empfunden. Gleichzeitig wurde auch Skepsis geäußert, ob das Konzept der Mauerwerksaktivierung funktioniert und welche Auswirkungen auf den thermischen Komfort resultieren könnten. Die Notwendigkeit von 2 Heizsystemen (Mauerwerksaktivierung und Zusatzheizung) wurde von einigen Interviewten kritisch gesehen und der ökologische und ökonomische Nutzen hinterfragt.

8.2.2 Technische Aspekte

Diese Kategorie umfasst 8 Unterkategorien und zeigt ein breites Spektrum an erörterten Fragen oder Kommentaren (s. Tabelle 35).

Tabelle 35: Subcodes zur Kategorie Technische Aspekte/Fragen

Subcodes	Anzahl der Nennungen
Heizkonzept/Wandfassadenheizung	23
Badezimmer	15
Heizkörper	13
Jalousien	9
Fenster	9
Gastherme	8
Warmwasser	5
Photovoltaik	2

Hauptthema in den Interviews war das Heizsystem und im Speziellen die Wandfassadenheizung. Insgesamt zeigen die Fragen und Kommentare deutlichen Informationsbedarf zum System selbst und zur konkreten Umsetzung. Eine Nutzung des Systems zur Kühlung im Sommer fänden einige Mietende gut. Einige Befragte erkundigten sich nach einem Austausch der Fenster. Einige Interviewte interessiert die Konsequenzen für die Badezimmer: kleinere Wandfläche. Es hat die Interviewten beschäftigt, in welchem Maße

¹¹ vgl. Broschüre anlässlich zum Jubiläum 111 Jahre bptm 2019-09-23

die Sanierung Komfortaspekte des Badezimmers betreffen würde, beispielsweise in Bezug auf Wärme oder Wasserdruck. Dies würde begrüßt, da der Wasserdruck eher niedrig sei. Die Handtuchheizung schätzten fast alle sehr und möchten sie nicht missen.

8.2.3 Raumklima

Eine zentrale Interviewfrage bezog sich auf das Raumklima und Aspekte des thermischen Komforts. Hierzu wurden in den Angaben der Befragten vorrangig der thermische Komfort im Winter sowie der Einfluss auf die Raumtemperatur thematisiert.

Tabelle 36: Subcodes zur Kategorie Raumklima

Subcodes	Anzahl der Nennungen
Thermischer Komfort im Winter	43
Individueller Einfluss auf die Raumtemperatur	26
Thermischer Komfort im Sommer	8
Luftqualität	8
Lüften	6

Einige Befragte nutzen Messgeräte für die Raumtemperatur und orientieren sich beim Heizen und Lüften daran. Es wurden auch Unterschiede im Empfinden der Raumtemperatur von verschiedenen Raumnutzern angesprochen. Ein relevanter Faktor war für die Befragten auch die Lage der Wohnung (z.B. Eckwohnung oder Erdgeschosswohnung). Dabei wurde unterschiedliches Heizverhalten, aber auch die Dämmung angeführt. Die Verschattungsmöglichkeit durch Außenjalousien soll nach Ansicht der Meisten erhalten bleiben.

Es wurde deutlich, dass das Heizen von der Raumfunktion abhängt. Nicht jeder Raum soll (auch aus Kostengründen) nicht gleich beheizt sein; daher wird das Schlafzimmer von vielen eher kühl gehalten oder gar nicht geheizt. Für Wohnzimmer und Küche wurde von den meisten eine Raumtemperatur von 21°-22° C angegeben; im Bad wurde ausreichende Wärme gewünscht und es solle je nach Bedarf schnell warm werden. In dem Zusammenhang beschäftigten viele Befragte die Abstimmung einer voreingestellten Grundwärme mit der unterschiedlichen Raumnutzung und es kam die Fragen auf, ob es dann in jedem Zimmer eine Zusatzheizung gäbe und was für ein Heizsystem das dann genau sei. Es wurde ein grundsätzlicher Konflikt zwischen dem Grundwärme-Heizkonzept und dem Wunsch nach individuellem Einfluss auf die Raumtemperatur gesehen.

8.2.4 Wohnkomfort

Beim Interviewthema Wohnkomfort standen Konsequenzen der Mauerwerksaktivierung für die Möblierung und Platzfragen im Vordergrund. Als problematisch empfanden fast alle die vermutete eingeschränkte Raumnutzung durch erforderlichen Abstand von Möbeln zur sanierten Wand. Es wurden Befürchtungen geäußert, dass die entsprechenden Wände nicht mehr wie gewohnt genutzt werden können; auch wird das Ziel der Sanierung in Bezug auf Komfort in Frage gestellt.

Tabelle 37: Subcodes zur Kategorie Wohnkomfort

Subcodes	Anzahl der Nennungen
Möbel	18
Platz	12
Bilder	9
Wände	5
Vorhänge	5
Küchenzeile	2

Vielfach gab es Fragen dazu, was eine Wandschlitzung für die Einbauküchen, Küchenzeilen bedeutet und wo nach der Sanierung beispielsweise ein Esstisch, Betten oder eine größere Wohnzimmerwand stehen können. Insbesondere Bewohnende einer Eckwohnung befürchteten durch die Außenwände erhebliche Platzeinbußen.

Zur empfundenen Problematik der Wandnutzung wurde verschiedentlich nachgefragt, ob es zur adäquateren individuellen Nutzung Möglichkeiten gibt, den Verlauf von Rohren sichtbar zu machen. Insbesondere in Hinblick auf Gemälde an der Außenwand wurde dies problematisiert, da eine Position an der gegenüberliegenden Wand bedeuten würde, dass die Bilder damit der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein würden und die Qualität der Bilder leiden würde.

8.2.5 Sanierungsablauf

Verschiedene Aspekte der Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen beschäftigte die Befragten sehr, wie die Anzahl der Nennungen in der Tabelle 38 aufzeigt.

Tabelle 38: Äußerungen zur Kategorie Sanierungsablauf

Subcodes	Anzahl der Nennungen
Vorgehen, Sanierungsdauer und praktische Unterstützung	40
Aufenthalt während der Sanierung	31

Informationsbedarf	29
Kommunikation während der Sanierung	23
Lärm/Dreck	16
Vorerfahrung mit anderen Sanierungen	16

Hauptfragen bezogen sich darauf, wie sich die einzelnen Maßnahmen konkret auf den Wohnalltag auswirken würden. Dazu zählte auch, welche Überlegungen zum Verbleib der Mietenden während der Sanierung angestellt werden (z.B. temporär anderweitige Unterbringung). Der Informationsbedarf zur Sanierung wurde deutlich formuliert und die Erwartungen an die Kommunikation zwischen pbtm und Mietenden im Vorfeld und während der Sanierung sind hoch. Einige Befragte bezogen sich auf Erfahrungen mit bereits erfolgten Baumaßnahmen im Quartier und Folgen wie Lärm und Dreck.

Eine zentrale Frage für die Projektgruppe war, wie die Akzeptanz für eine Sanierung im bewohnten Zustand ausfallen würde oder ob die Mietenden eine temporäre anderweitige Unterbringung bevorzugen würden. Die meisten Befragten äußerten, dass sie für die Dauer der Sanierung eine Ausweichmöglichkeit haben möchten. Die Sanierung solle zeitlich komprimiert pro Wohnung erfolgen und den Fensteraustausch gleich einschließen.

Die Befragten hatten großen Informationsbedarf bezüglich konkreter Aspekte des Sanierungsablaufes. Fragen waren beispielsweise: Wie lange dauert die Sanierung insgesamt und pro Wohnung? Wird die Wohnung danach grundgesäubert oder renoviert (Streicharbeiten, Fliesen etc.)? Gibt es praktische Hilfe beim Möbelrücken oder Auslagern der Möbel?

Die Befragten wünschten sich, dass der Informationsaustausch rechtzeitig erfolgt, möglichst mit mehreren Monaten Vorlaufzeit, auch wegen geplanter eigener Renovierungsarbeiten in der Wohnung. Die Kommunikation solle offen und vollständig sein und transparent im Umgang mit Problemen. Es sollten verschiedene Kommunikationswege genutzt werden wie Aushänge, Einwürfe, regelmäßige E-Mails, Informationen auf der Homepage der pbtm.

8.2.6 Zufriedenheitsbewertungen zur Wohnung

Die Zufriedenheit mit der jetzigen Heizung war für acht der elf befragten Personen überwiegend gegeben (eher zufrieden / zufrieden; s. Abbildung 115). Jeweils eine Person war unentschieden in der Bewertung bzw. eher unzufrieden. Vergleichbar zeigt sich die Bewertung der Bedienbarkeit der Heizung. Mit der Wohnung insgesamt zeigten sich zwei Befragte eher zufrieden, acht Personen waren zufrieden.

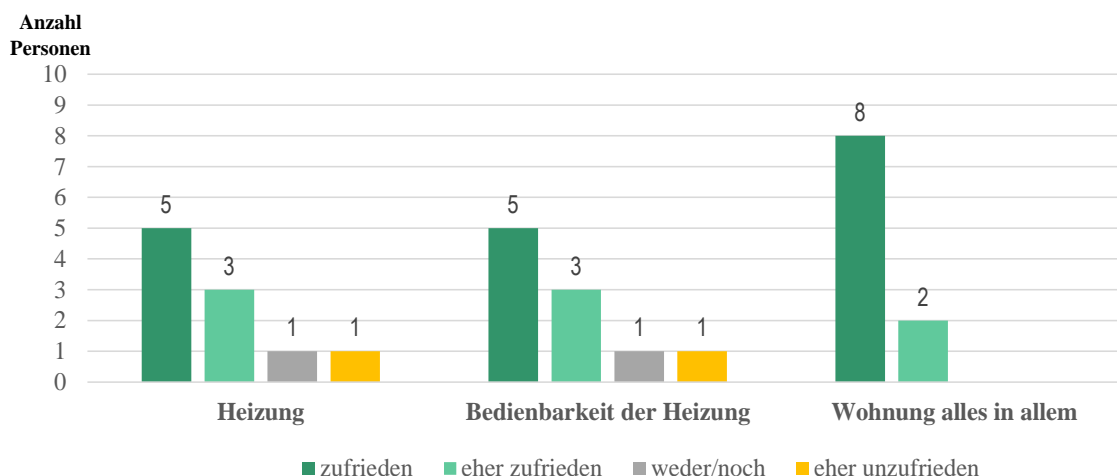


Abbildung 115: Verteilung der Zufriedenheitsbewertungen zu Heizung und Wohnung

8.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Sanierungskonzept wurde aus Umwelt- und Energiegründen von den Befragten grundsätzlich begrüßt. Das Prinzip der Mauerwerksaktivierung und die konkrete Umsetzung im Gebäudekomplex waren für die Mieterinnen und Mieter schwierig nachvollziehbar. Sie stellten Fragen danach, wie das Vorhaben als Quartierskonzept gelingen kann und was das Konzept für die einzelnen Wohnungen in Bezug auf thermischen Komfort und Wohnkomfort bedeutet.

Es gab neben einer allgemeinen Offenheit auch Skepsis und Fragen hinsichtlich der Grundwärme durch die Mauerwerksaktivierung, u.a. wie die Grundwärme auf die verschiedene Raumnutzung abgestimmt wäre. Es gab Befürchtungen, dass es Einbußen beim thermischen Komfort (zu warme oder zu kalte Räume) geben könne. Es wurde ein Konflikt zwischen dem Grund-Heizkonzept und dem Wunsch nach individuellem Einfluss auf die Raumtemperatur gesehen. Die Lage der Wohnung im Gebäude spiele dabei nach Ansicht der Befragten eine wichtige Rolle, je nachdem ob in einer Wohnung darüber oder darunter geheizt würde und aufgrund von Fußkälte bei den EG-Wohnungen durch fehlende Dämmung der Kellerdecke.

Ebenso wurde bei dem Sanierungskonzept ein Dilemma zwischen Behaglichkeit und Raumnutzung gesehen, wenn der Fassadenbereich durch die Mauerwerksaktivierung nur eingeschränkt genutzt werden könne. Der Schnitt bzw. die Lage der Wohnung spielt diesbezüglich bei der Möglichkeit der Einrichtung eine Rolle (z.B. Anzahl der Außenwände, Eckwohnung).

Es empfiehlt sich, im Rahmen einer Sanierung ein passendes Kommunikationskonzept aufzusetzen. Informationen sollten möglichst zeitnah und konkret erfolgen, um technische Fragen (z.B. zum Energiekonzept) und praktische Fragen (Beginn, Verlauf, Dauer

der Sanierung, Varianten für Verbleib oder temporären Auszug) aufzugreifen. Auch über praktische Hilfsangebote für die Mieterinnen und Mieter wäre zu entscheiden. Die Möglichkeit zur Besichtigung einer Musterwohnung mit einer Visualisierung der möglichen Raumnutzung im Wandbereich wäre hilfreich, um Verständnis und Akzeptanz bei den Bewohnenden des Quartiers zu erreichen.

9 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen interpretiert werden.

9.1 Simulation mit IDA ICE

In Tabelle 39 und 40 sind die Ergebnisse zum Endenergiebedarf, Primärenergiebedarf und zu den CO₂-Emissionen für die Referenzwohnung für beide Varianten und pro Jahr zusammengefasst. Werden beide Varianten verglichen, reduziert sich pro Jahr der Endenergiebedarf um ca. 17 % von 131 kWh/m² auf 109,4 kWh/m² für das TRY 2015 und von 99,98 kWh/m² auf 83,4 kWh/m² für das TRY 2045. Die CO₂-Emissionen reduzieren sich um ca. 27 % von 31,4 kg/m² auf 22,9 kg/m² für TRY 2015 und von 23,0 kg/m² auf 17,4 kg/m² für das TRY 2045. Der Primärenergiebedarf reduziert sich ebenfalls um 92 % von 144,0 kWh/m² auf 10,9 kWh/m² für das TRY 2015 und von 109,9 kWh/m² auf 8,3 kWh/m² für das TRY 2045. Die signifikante Reduzierung erklärt sich dadurch, dass in München Fernwärme einen deutlich besseren Primärenergiefaktor von 0,11 (1,1 für Gas) hat.

Tabelle 39: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2015

	Energetische Kennwerte					
	Konventionelle Heizsystem mit Gas			BTA mit Fernwärme		
	TRY 2015			TRY 2015		
	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)
Gesamt	6925,1	1662,0	7617,6	5784,8	1209,0	578,5
Pro m²	131,0	31,4	144,0	109,4	22,9	10,9

Tabelle 40: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2045

	Energetische Kennwerte					
	Konventionelle Heizsystem mit Gas			BTA mit Fernwärme		
	TRY 2045			TRY 2045		
	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)
Gesamt	5285,6	1268,5	5814,2	4409,3	921,5	440,9
Pro m²	99,98	23,0	109,9	83,4	17,4	8,3

Unter Betrachtung des Anstiegs der Jahresdurchschnittstemperatur, werden die Energiebedarfe also sinken, um in Zukunft die Norm-Innentemperaturen aufrechtzuerhalten. Die

höchsten Werte für den Energiebedarf werden im Winter (01.12.2020 bis 29.02.2020) erreicht und die tiefsten Werte im Sommer (01.06.2020 bis 31.08.2020). Der Energiebedarf, der im Frühling (01.03.2020 bis 31.05.2020) berechnet wurden, entspricht aufgrund der ähnlichen meteorologischen Bedingungen ungefähr dem Energiebedarf im Herbst (01.09.2020 bis 31.11.2020). Dadurch, dass der Warmwasserbedarf konstant und nicht wetterabhängig ist, sind kaum Unterschiede im Energiebedarf zu bemerken. Der Warmwasserbedarf ist stark vom Nutzerverhalten abhängig.

Die über das Jahr gemittelten operativen Temperaturen und Lufttemperaturen sowie die PPD-Werte für die unterschiedlichen Zonen sind in Tabelle 41 dargestellt. Die Differenz zwischen den operativen Temperaturen und Lufttemperaturen für beide Varianten und Referenzperioden beträgt nicht mehr als 1 °C. Das Bad/WC zeigt kritische Werte bei der Variante Bauteileaktivierung mit Fernwärme. Die mittlere operative Temperatur liegt beispielsweise für das TRY 2015 bei 21,45 °C und die mittlere Lufttemperatur bei 21,46 °C. Die Diskrepanz zum konventionellen Heizsystem mit Gas beträgt ca. 3 °C. Es handelt sich, wie schon oben erwähnt um Mittelwerte und es bestehen während der festgelegten Simulationsperiode durchaus Schwankungen. Durch die etwas niedrigeren Temperaturen bei der Variante BTA mit Fernwärme sind die PPD-Werte etwas höher. Das bedeutet, dass es etwas unbehaglicher mit der Variante BTA und Fernwärme ist. Allgemein liegen die Temperaturen für das TRY 2045 höher als die für das TRY 2015.

Tabelle 41: Temperaturschlüsselwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2015

	Temperaturschlüsselwerte					
	Konventionelle Heizsystem mit Gas			BTA mit Fernwärme		
	TRY 2015			TRY 2015		
	Mittelwert Op.Tempera- tur °C	Mittelwert Lufttempera- tur °C	PPD %	Mittelwert Op.Tempera- tur °C	Mittelwert Lufttempera- tur °C	PPD %
Wohnzim- mer	21,39	21,7	4,93	21,22	21,18	5,33
Schlafzim- mer	21,5	21,77	6,64	21,21	21,19	7,72
Bad/WC	24,11	24,64	1,39	21,47	21,45	3,52
Küche	21,94	22,12	3,41	21,51	21,46	3,96
Flur	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 42: Temperaturschlüsselwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme, TRY 2045

Temperaturschlüsselwerte					
--------------------------	--	--	--	--	--

	Konventionelle Heizsystem mit Gas			BTA mit Fernwärme		
	TRY 2045			TRY 2045		
	Mittelwert Op.Temperatur °C	Mittelwert Lufttemperatur °C	PPD %	Mittelwert Op.Temperatur °C	Mittelwert Lufttemperatur °C	PPD %
Wohnzimmer	22,79	23,03	5,47	22,09	22,05	4,74
Schlafzimmer	22,89	23,1	7,22	22,13	22,1	6,82
Bad/WC	25,07	25,49	2,42	22,38	22,36	3,17
Küche	23,35	23,47	5,50	22,4	22,36	3,70
Flur	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Es wird festgestellt, dass die Diskrepanz zwischen Lufttemperatur und operativer Temperatur kleiner wird, je höher die Außentemperaturen sind. Die höchsten Temperaturwerte werden im Sommer erreicht und die tiefsten im Winter. Allgemein führt der Anstieg der Außentemperaturen zu einem leichten Anstieg der Luft- und operativen Temperaturen. Dadurch, dass der Flur nicht belegt ist, werden hier keine operativen Temperaturen und PPD-Werte registriert. Die Effekte der Steigerung der Außentemperaturen sind auf das Innenklima spürbar, wie in Tabelle 42 und 43 nachgewiesen. Allerdings ist zu beachten, dass zu bestimmten Zeiten viel höhere PPD-Werte gemessen werden. Es handelt sich bei den dargestellten Ergebnissen um gemittelte Werte.

Weitere Parameter, wie Solarertrag und Tageslichtintensität, bleiben für beide Varianten bis auf sehr minimale Änderungen unverändert. Die Tagesverläufe und die Verläufe zu unterschiedlichen Jahreszeiten sind identisch. Sie sind unabhängig vom Heizsystem und Energieträger. Es bestehen aber Unterschiede zwischen beiden Referenzperioden. Allgemein sind die Solarerträge und Tageslichtintensitäten für das TRY 2045 höher als die für das TRY 2015.

Tabelle 43: Solarertrag und Tageslichtintensität für das TRY 2015 und TRY 2045

	Solarertrag und Tageslichtintensität											
	Konventionelle Heizsystem mit Gas						BTA mit Fernwärme					
	TRY 2015			TRY 2045			TRY 2015			TRY 2045		
	Solarertrag W	Max. Solarertrag W/m²	Tageslicht Lux	Solarertrag W	Max. Solarertrag W/m²	Tageslicht Lux	Solarertrag W	Max. Solarertrag W/m²	Tageslicht Lux	Solarertrag W	Max. Solarertrag W/m²	Tageslicht Lux
Wohnzimmer	32,73	24,02	221,6	38,13	23,9	260,1	32,76	24,17	223	38,36	23,98	258,1
Schlafzimmer	33,5	35,73	227,4	39,02	35,55	258,8	33,52	35,95	228,2	39,25	35,67	259,5
Bad/WC	14,43	40,96	350,9	17,12	40,55	431,9	14,43	40,98	347,8	17,11	40,53	429,8
Küche	36,86	45,68	193	43,76	44,9	234,6	36,87	45,68	194,2	43,7	45,14	236,3
Flur	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Die Solarerträge für das TRY 2045 für die unterschiedlichen Zonen liegen höher als die für das TRY 2015. Der Solarertrage für das Wohn- und Schlafzimmer sind fast identisch, weil beide Fenster die gleichen Bemaßungen haben und beide nach Osten weisen. Die

Küche hat einen großen Solarertrag aufgrund der Größe der Öffnung und des höheren Glasanteils. Die kleineren Fensterflächen im Bad verursachen einen kleinen Solarertrag. Zum Zeitpunkt der Simulation sind die Türen zum Flur geschlossen, sodass kaum Tageslicht im Flur gemessen werden kann. Dadurch, dass das Bad/WC besonders klein ist, sollen die Messpunkte an die Raumgröße angepasst werden. Somit sitzt der neue Messpunkt näher am Fenster, was dazu führt, dass viel höhere Tageslichtintensitäten gemessen werden als in anderen Zonen.

Die Simulation des ganzen Wohnblocks hat folgende Ergebnisse geliefert.

Tabelle 44: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme für den Wohnblock, TRY 2015

Objekt	Energetische Kennwerte														
	Konventionelle Heizsystem mit Gas						BTA mit Fernwärme						Energieausweise		
	TRY 2015						TRY 2015								
	Endenergiebedarf (KWh)		CO ₂ (kg)		Primärenergiebedarf (KWh)		Endenergiebedarf (KWh)		CO ₂ (kg)		Primärenergiebedarf (KWh)		Endenergiebedarf (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergiebedarf (KWh)
Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Pro m ²	Pro m ²	Pro m ²	
Menradstr. 3	117045,0	140,5	28090,8	33,7	128749,5	154,6	98360,0	118,1	20557,2	24,7	9836,0	11,8	146,5	44,9	199,2
Menradstr. 5	116447,7	147,1	27947,4	35,3	128092,5	161,8	92808,5	117,3	19397,0	24,5	9280,9	11,7	141,1	43,7	193,5
Menradstr. 7	178338,6	149,8	42801,3	35,94	196172,5	164,8	166631,6	139,9	34805,1	29,2	16663,2	14,0	161,6	48,8	216,2
Renatastr. 1	127435,0	188,5	30584,4	45,2	140178,5	207,4	112029,0	165,7	23414,1	34,6	11202,9	16,6			
Renatastr. 3	124790,0	159,6	29949,6	38,3	137269,0	175,6	117842,0	150,8	24629,0	31,5	11784,2	15,1	236,0	68,4	302,9
Renatastr. 5	126740,0	186,9	30417,6	44,9	139414,0	205,6	118808,0	175,2	24830,9	36,6	11880,8	17,5			
Renatastr. 9	104686,3	162,9	25124,7	39,1	115154,9	179,1	100813,6	156,8	21070,0	32,8	10081,4	15,7	160,8	48,7	216,0
Renatastr. 11	92418,3	182,3	22180,4	43,8	101660,1	200,5	88414,8	174,4	18478,7	36,5	8841,5	17,4	132,4	41,1	182,2
Renatastr. 13	99896,0	149,4	23975,0	35,9	109885,6	164,4	96753,0	144,7	20221,4	30,3	9675,3	14,5	144,1	44,5	197,3
Renatastr. 15	104372,3	124,1	25049,4	29,8	114609,5	136,5	101277,1	120,4	21166,9	25,2	10127,7	12,0	132,5	41,3	183,0
Renatastr. 17	132196,0	193,1	31727,0	46,4	145415,6	212,4	125901,8	183,9	26313,5	38,4	12590,2	18,4	197,4	58,2	258,2
Renatastr. 17a	132969,5	186,9	31912,7	44,85	146266,5	205,5	125637,9	176,6	26258,3	36,9	12563,8	17,7	207,0	60,7	269,2
Renatastr. 17b	127538,0	189,1	30609,1	45,4	140291,8	208,0	119677,3	177,4	25012,6	37,1	11967,7	17,7	218,5	63,6	282,2
Renatastr. 19	98436,4	144,1	23624,7	34,6	108280,0	158,5	95419,2	139,7	19942,6	29,2	9541,9	14,0	155,8	47,5	210,5
Renatastr. 21	98932,0	145,3	23743,7	34,9	108825,2	159,8	95930,3	140,3	19965,8	29,3	9553,0	14,0	167,7	50,5	224,0
Renatastr. 23	118993,0	142,4	28558,3	34,2	130892,3	156,7	113694,0	136,1	23762,0	28,4	11369,4	13,6	157,3	47,7	211,2
Renatastr. 25	193169,0	155,8	46360,6	37,4	212485,9	171,4	176863,0	142,6	36964,4	29,8	17686,3	14,3	157,8	47,8	212,0
Schäringerstr. 22	99926,1	112,5	23982,3	27,0	109918,7	123,7	97829,2	110,1	20446,3	23,0	9782,9	11,0	125,6	39,4	174,8
Schäringerstr. 24	99404,0	120,5	23857,0	28,9	109344,4	132,5	92357,0	111,9	19302,6	23,4	9235,7	11,2	143,9	44,2	195,9
Schäringerstr. 26	120496,0	125,9	28919,0	30,2	132545,6	138,5	111911,0	116,9	23389,4	24,4	11191,1	11,7	156,3	47,6	211,0
Schäringerstr. 28	115863,3	137,4	27807,1	33,13	127449,3	151,1	95004,0	112,6	19855,8	23,5	9500,4	11,7	150,2	45,8	203,1

Tabelle 45: Energetische Kennwerte der Variante konventionelle Heizsystem mit Gas und BTA mit Fernwärme für den Wohnblock, TRY 2045

Objekt	Energetische Kennwerte														
	Konventionelle Heizsystem mit Gas						BTA mit Fernwärme						Energieausweise		
	TRY 2045						TRY 2045								
	Ende. (KWh)		CO ₂ (kg)		Prim. (KWh)		Ende. (KWh)		CO ₂ (kg)		Prim. (KWh)		Ende. (KWh)	CO ₂ (kg)	Prim. (KWh)
	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Pro m ²	Pro m ²	Pro m ²
Menradstr. 3	881940,0	105,9	21166,6	25,4	97013,4	116,5	73240,8	87,95	15307,3	18,4	7324,1	8,8	146,5	44,9	199,2
Menradstr. 5	85594,1	108,1	20542,6	25,9	94153,5	119,0	69050,9	87,24	14431,6	18,2	6905,1	8,7	141,1	43,7	193,5
Menradstr. 7	137171,5	115,2	32921,1	27,6	150888,7	126,7	126796,7	106,49	18340,1	15,40	8775,1	7,4	161,6	48,8	216,2
Renatastr. 1	96075,6	142,1	23058,1	34,1	105683,2	156,3	84858,6	125,5	17735,4	26,2	8485,9	12,6			
Renatastr. 3	96849,6	118,8	22283,9	28,5	102134,6	130,7	87212,2	111,6	18227,3	23,3	8721,2	11,2	236,0	68,4	302,9
Renatastr. 5	96774,6	142,7	23225,9	34,3	106452,0	157,0	91347,5	134,7	19091,6	28,2	9134,8	13,5			
Renatastr. 9	75330,8	117,2	18079,4	28,1	82863,9	128,9	73718,6	114,7	15407,2	24,0	7371,9	11,5	160,8	48,7	216,0
Renatastr. 11	69092,0	136,3	16582,1	32,7	76001,2	149,9	66618,2	131,4	13923,2	27,5	6661,8	15,1	132,4	41,1	182,2
Renatastr. 13	74991,1	112,2	17997,9	26,9	82490,2	123,4	72985,2	109,2	15253,9	22,8	7298,5	10,9	144,1	44,5	197,3
Renatastr. 15	76575,6	91,05	18378,1	21,9	84233,1	100,2	74634,9	88,75	15598,7	18,6	7463,5	8,9	132,5	41,3	183,0
Renatastr. 17	97563,2	142,5	23415,2	34,2	107319,6	156,8	92362,3	134,9	19303,7	28,2	9236,2	13,5	197,4	58,2	258,2
Renatastr. 17a	99857,2	140,3	23965,7	33,7	109843,0	154,4	92892,7	130,5	19414,5	27,3	9289,3	13,1	207,0	60,7	269,2
Renatastr. 17b	94662,6	140,3	22719,0	33,7	104128,9	154,4	87858,6	130,1	18341,5	27,2	8775,9	13,0	218,5	63,6	282,2
Renatastr. 19	75888,5	111,1	18213,2	26,7	83477,3	122,2	73103,8	107,0	15278,7	22,4	7310,4	10,7	155,8	47,5	210,5
Renatastr. 21	76171,0	111,9	18281,0	26,8	83788,1	123,0	73406,7	107,8	15342,0	22,5	7340,7	10,8	167,7	50,5	224,0
Renatastr. 23	86030,1	103,0	20647,2	24,7	94633,1	113,3	83678,9	100,2	17488,9	20,9	8367,9	10,0	157,3	47,7	211,2
Renatastr. 25	144104,4	116,2	34585,1	27,9	158514,8	127,8	132611,4	107,0	27715,8	22,4	13261,1	10,7	157,8	47,8	212,0
Schäringerstr. 22	73063,6	82,2	17535,3	19,7	80369,9	90,5	71835,1	80,85	15013,5	16,9	7183,5	8,1	125,6	39,4	174,8
Schäringerstr. 24	71665,1	86,87	17199,6	20,9	78831,6	95,5	67644,3	81,99	14137,7	17,1	6764,4	8,2	143,9	44,2	195,9
Schäringerstr. 26	88006,3	91,96	21121,5	22,1	96806,9	101,2	82001,4	85,69	17138,3	17,9	8200,1	8,6	156,3	47,6	211,0
Schäringerstr. 28	86427,7	102,5	20742,6	24,6	95070,5	112,7	69883,6	82,85	14605,7	17,3	6988,4	8,3	150,2	45,8	203,1

Die beiden Eckgebäude, Renatastr 25 und Menradstr. 7, weisen die höchsten Endenergiebedarfe mit jeweils 193 und 178 MWh pro Jahr. Beide Gebäude besitzen die größten Grund-, Außenwand- und Fensterflächen. Die Renatastr. 11 weist den geringsten Endenergiebedarf mit ca. 92 MWh auf. Wird der flächenspezifische Endenergiebedarf betrachtet liegt die Renatastr 17 mit 193,1 kWh/m² pro Jahr vorne gefolgt von der Renatastr. 17b mit 189,1 kWh/m² pro Jahr. Die Schäringerstr. 22 hat mit 112,5 kWh/m² pro Jahr den kleinsten spezifischen Endenergiebedarf. Bei der Variante des konventionellen Heizsystems mit Gas als Energieträger liegt der durchschnittliche spezifische Endenergiebedarf des ganzen Wohnblocks für das TRY 2015 bei ca. 154,48 kWh/m² pro Jahr und 128,56 kWh/m² für das TRY 2045. Bei der Variante Bauteilaktivierung mit Fernwärme sinken diese Werte um ca. 7 % von ca. 154,48 kWh/m² auf 143,37 kWh/m². Für das TRY 2045 sinkt der Endenergiebedarf sogar um ca. 16 % von 128,56 kWh/m² auf 106,97 kWh/m². Auf den Energieausweisen, die zur Verfügung stehen, beträgt der durchschnittliche Endenergiebedarf (nur Heizen) für das ganze Wohnquartier ca. 162,76 kWh/m². Die Renatastr. 1, 3 und 5 wurden zusammengerechnet.

Der spezifische Primärenergiebedarf liegt bei konventionellen Heizsystemen bei ca. 169,92 kWh/m² pro Jahr für das TRY 2015 und 126,69 kWh/m² pro Jahr für das TRY 2045. Wird zu Bauteilaktivierung mit Fernwärme gewechselt, reduziert sich der spezifische Primärenergiebedarf auf ca. 14,36 kWh/m² pro Jahr für das TRY 2015 und 10,65

kWh/m² pro Jahr für das TRY 2045. Dabei wird eine Einsparung von ca. 90 % erzielt. Die sehr hohe Einsparung ist nur möglich wegen des geringen Primärenergiefaktors von Fernwärme in München (0,11). Die Energieausweise hingegen geben einen durchschnittlichen Primärenergiebedarf von ca. 218,02 kWh/m² pro Jahr wieder. Dabei ist jedoch auch der Primärenergiebedarf von Warmwasser enthalten.

Die CO₂-Emissionen betragen im Durchschnitt 37,09 kg/m² für die Variante 1 für das TRY 2015 und nur noch 27,64 kg/m² für das TRY 2045. Für die Variante 2 sinken die Werte um ca. 19 %, von 37,09 kg/m² auf 29,96 kg/m² für das TRY 2015 und von 27,64 kg/m² auf 22,03 kg/m² für das TRY 2045. Den Energieausweisen sind durchschnittliche CO₂-Emissionen von 49,18 kg/m² zu entnehmen. Dabei muss beachtet werden, dass die CO₂-Emissionen für Warmwasser ebenfalls berücksichtigt wurden.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Verschattung auf den Endenergiebedarf für die Renatastr. 17 untersucht. Die Ergebnisse sind wie folgt zusammengefasst.

Tabelle 46: Endenergiebedarf der Renatastr. 17 mit und ohne Verschattung

Objekt	Endenergiebedarf							
	Heizen							
	Ohne Verschattung				Mit Verschattung			
	TRY 2015		TRY 2045		TRY 2015		TRY2045	
	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²	Gesamt	Pro m ²
Renatastr 17	132196,0	193,1	97563,2	142,5	137124,0	200,3	103114,0	150,6

Der Gesamtendenergiebedarf steigt pro Jahr um 7,2 kWh/m² bei der Variante mit Verschattung für das TRY 2015 und um 8,1 kWh/m² pro Jahr für das TRY 2045. Aufgrund der Verschattung durch Bäume und Nachbargebäude werden die Wärmeerträge aus der Sonnenstrahlung zur Gebäudeheizung gemindert, was zu einem erhöhten Heizwärmebedarf führt. Wie beim Endenergiebedarf steigt ebenfalls der Primärenergiebedarf bei der Variante mit Verschattung um 8 kWh/m² pro Jahr für das TRY 2015 und 8,9 kWh/m² pro Jahr für das TRY 2045. Die CO₂-Emissionen steigen auch um 1,7 kg/m² pro Jahr für das TRY 2015 und 1,9 kg/m² pro Jahr für das TRY 2045.

Die Temperaturwerte beim konventionellen Heizsystem und Gas als Energieträger liegen im Durchschnitt höher als die bei der Bauteilaktivierung mit Fernwärme als Energieträger. Für die Variante Konventionelle Heizsystem mit Gas variieren die operativen Temperaturen zwischen 20,01 °C und 22,33 °C. Die Lufttemperaturen hingegen variieren zwi-

schen 21 °C und 22,58 °C für die Referenzperiode TRY 2015. Der Prozentsatz der Unzufriedenen liegt zwischen 14 % und 23,22 %. Bei der Variante BTA und Fernwärme variieren die mittleren operativen Temperaturen innerhalb des TRY 2015 zwischen 18,09 °C im Erdgeschoss in der Menradstr. 3 und 22,45 °C im zweiten Obergeschoss in der Renatastr 15. Bei der Lufttemperatur variieren die Werte zwischen 18,39 °C im Erdgeschoss in der Menradstr. 3 und 22,4 °C ebenfalls im zweiten Obergeschoss in der Renatastr 15. Bei den Geschossen mit hohen Temperaturen wurden ebenfalls niedrige PPD-Werte registriert und umgekehrt. Am unbehaglichsten sind die Erdgeschosse und vierten Obergeschosse. Am behaglichsten sind die zweiten Geschosse. Bei der Behaglichkeit spielt auch die Raumhöhe eine entscheidende Rolle. Die Etagen weisen meistens Unterschiede in der Raumhöhe auf.

Tabelle 47: Temperaturschlüsselwerte der Varianten 1 und 2

Objekt		Temperaturschlüsselwerte											
		Konventionelle Heizsystem mit Gas						BTA mit Fernwärme					
		TRY 2015			TRY 2045			TRY 2015			TRY 2045		
		Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %
Menradstr. 3	EG	20,13	21,01	22,26	20,27	21,05	21,21	18,09	18,39	44,34	18,63	18,93	38,39
	1.OG	21,37	21,6	15,24	22,2	22,39	12,98	21,02	21,09	17,29	21,85	21,91	14,11
	2.OG	21,63	21,83	14,48	22,66	22,81	13,63	21,53	21,54	14,57	22,43	22,44	12,07
	3.OG	21,42	21,64	15,05	22,25	22,42	12,83	21,12	21,16	16,35	21,89	21,93	13,6
Menradstr. 5	EG	20,16	21,0	22,01	20,32	21,05	20,87	18,26	18,53	42,37	18,81	19,07	36,48
	1.OG	21,55	21,75	14,68	22,53	22,68	12,77	21,1	21,12	18,04	22,06	22,08	14,0
	2.OG	21,92	22,08	14,0	23,21	23,31	13,78	21,6	21,58	16,16	22,7	22,67	12,5
	3.OG	21,89	22,08	14,34	23,22	23,36	14,63	21,08	21,09	21,22	22,34	22,33	15,73
Menradstr. 7	EG	20,1	21,02	22,58	20,26	21,09	21,46	18,42	18,73	40,76	18,75	19,07	37,68
	1.OG	22,33	22,55	14,9	24,05	24,21	20,93	22,32	22,3	12,13	23,1	23,08	10,85
	2.OG	22,3	22,52	14,84	24,02	24,18	20,73	22,29	22,27	12,22	23,05	23,03	10,93
	3.OG	22,3	22,52	14,86	24,01	24,17	20,7	22,29	22,27	12,22	23,05	23,03	10,93
Renatastr. 1	EG	20,29	21,12	21,45	20,83	21,53	18,95	18,62	18,88	39,94	19,35	19,61	33,96
	1.OG	21,87	22,17	15,21	23,19	23,42	16,1	21,66	21,69	15,65	22,51	22,52	13,44
	2.OG	22,32	22,58	15,07	23,84	24,04	19,36	22,22	22,21	13,2	23,06	23,04	11,91
	3.OG	22,02	22,31	14,72	23,27	23,49	15,24	21,83	21,86	14,47	22,63	22,66	12,59
Renatastr. 3	EG	20,26	21,07	21,39	20,7	21,38	19,08	20,1	20,45	23,21	20,47	20,8	20,92
	1.OG	21,89	22,15	14,42	23,16	23,36	14,14	22,09	22,11	12,47	22,84	22,86	10,9
	2.OG	22,3	22,52	14,02	23,76	23,92	16,33	22,39	22,38	11,81	23,17	23,16	10,56
	3.OG	21,95	22,19	14,13	23,1	23,28	13,28	21,99	21,96	12,79	22,68	22,72	11,11
Renatastr. 5	EG	20,17	21,05	22,09	20,57	21,33	19,93	20,32	20,68	21,17	20,54	20,89	20,0
	1.OG	21,51	21,85	15,65	22,6	22,88	14,49	21,85	21,87	13,17	22,5	22,52	11,68
	2.OG	21,81	22,11	15,1	23,07	23,32	15,47	22,07	22,07	12,65	22,77	22,77	11,31
	3.OG	21,57	21,9	15,37	22,63	22,89	14,14	21,86	21,88	13,14	22,51	22,54	11,65
Renatastr. 9	EG	20,25	21,09	21,55	20,75	21,45	19,05	20,25	20,59	22,05	20,63	20,96	19,89
	1.OG	21,71	22,02	15,11	22,98	23,22	14,59	21,99	22,01	12,81	22,73	22,75	11,2
	2.OG	22,04	22,32	14,73	23,5	23,71	16,59	22,23	22,22	12,21	23,01	23,0	10,86
	3.OG	21,84	22,13	14,81	23,14	23,38	14,83	22,1	22,12	12,46	22,85	22,87	10,98
Renatastr. 11	EG	20,57	21,13	19,29	21,1	21,55	17,04	21,06	21,16	16,07	21,42	21,51	14,67
	1.OG	21,38	21,65	15,78	22,45	22,64	14,22	21,83	21,73	13,12	22,52	22,44	11,51
	2.OG	21,55	21,81	15,42	22,75	22,94	14,64	21,94	21,85	12,878	22,69	22,6	11,32
	3.OG	21,4	21,68	15,71	22,47	22,68	14,18	21,8	21,73	13,34	22,51	22,46	11,72
Renatastr. 11	EG	20,74	21,14	18,13	21,26	21,57	16,09	21,2	21,18	15,27	21,55	21,53	13,99

Objekt		Temperaturschlüsselwerte											
		Konventionelle Heizsystem mit Gas						BTA mit Fernwärme					
		TRY 2015			TRY 2045			TRY 2015			TRY 2045		
		Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %
Renatastr. 13	EG	20,15	21,0	22,06	20,35	21,08	20,77	19,86	20,21	24,92	20,07	20,4	23,24
	1.OG	21,55	21,8	14,95	22,53	22,74	13,15	21,79	21,81	13,28	22,49	22,51	11,5
	2.OG	21,91	22,12	14,17	23,1	23,26	13,59	22,11	22,1	12,43	22,89	22,88	10,92
	3.OG	21,65	21,88	14,57	22,62	22,8	12,87	21,76	21,79	13,38	22,48	22,51	11,57
	4.OG	20,52	21,01	19,31	20,68	21,06	18,34	19,37	19,39	29,86	19,67	19,68	27,2
Renatastr. 15	EG	20,29	21,08	21,14	20,71	21,38	19,0	20,46	20,69	20,65	20,89	21,12	18,55
	1.OG	21,95	22,18	14,25	23,19	23,37	14,43	22,16	22,15	12,35	22,9	22,89	11,02
	2.OG	22,38	22,57	14,03	23,85	23,99	17,7	22,45	22,4	11,75	23,2	23,17	10,75
	3.OG	22,11	22,31	14,0	23,4	23,56	15,04	22,23	22,21	12,13	22,94	22,94	10,88
	4.OG	20,92	21,26	17,18	21,53	21,8	15,01	20,89	20,91	17,52	21,28	21,3	15,88
Renatastr. 17	EG	20,33	21,13	21,09	20,85	21,53	18,61	20,9	21,07	17,64	21,37	21,54	15,8
	1.OG	21,71	21,97	15,0	22,93	23,12	14,42	22,15	22,05	12,18	22,89	22,81	10,74
	2.OG	21,96	22,19	14,66	23,32	23,49	15,61	22,27	22,17	11,92	23,04	22,96	10,6
	3.OG	21,7	21,96	14,87	22,83	23,03	13,79	22,13	22,05	12,19	22,85	22,79	10,74
	4.OG	20,51	21,02	19,46	20,77	21,16	18,02	21,18	21,15	15,41	21,5	21,48	14,18
Renatastr. 17a	EG	20,01	21,0	23,22	20,13	21,01	22,3	20,78	21,0	17,6	20,94	21,15	16,8
	1.OG	21,59	21,81	15,1	22,83	22,98	14,2	21,91	22,01	12,5	22,75	22,67	10,84
	2.OG	21,51	21,74	15,2	22,67	22,83	13,82	21,95	21,85	12,67	22,6	22,68	11,01
	3.OG	21,29	21,54	15,7	22,22	22,41	13,6	21,81	21,72	12,98	22,48	22,42	11,31
	4.OG	20,63	21,04	18,64	20,96	21,28	17,01	21,26	21,22	14,93	21,59	21,62	13,63
Renatastr. 17b	EG	20,11	21,01	22,49	20,37	21,14	20,81	20,94	21,14	16,75	21,31	21,51	15,18
	1.OG	21,22	21,56	16,24	22,16	22,43	13,97	21,75	21,75	13,32	22,47	22,47	11,52
	2.OG	21,47	21,78	15,54	22,58	22,82	13,84	21,9	21,89	12,96	22,66	22,66	11,22
	3.OG	21,3	21,62	15,92	22,23	22,48	13,7	21,76	21,77	13,29	22,47	22,49	11,5
	4.OG	20,45	21,0	19,86	20,64	21,07	18,68	20,96	20,96	16,58	21,23	21,26	15,36
Renatastr. 19	EG	20,31	21,09	21,1	20,73	21,41	19,01	20,93	21,06	17,36	21,29	21,42	16,06
	1.OG	21,89	22,1	14,61	23,08	23,25	15,11	22,08	21,99	12,37	22,66	22,59	11,25
	2.OG	22,28	22,46	14,48	23,68	23,82	18,29	22,24	22,15	12,0	22,85	22,77	10,99
	3.OG	22,04	22,24	14,33	23,28	23,44	15,63	22,07	22,0	12,34	22,64	22,59	11,2
	4.OG	20,9	21,25	17,32	21,49	21,76	15,29	21,01	21,0	16,52	21,29	21,28	15,53
Renatastr. 21	EG	20,29	21,07	21,2	20,58	21,27	19,57	20,98	21,1	17,04	21,33	21,46	15,8
	1.OG	21,75	21,92	14,45	22,42	22,46	12,81	22,11	22,02	12,26	22,68	22,61	11,17
	2.OG	22,18	22,36	14,12	23,23	23,38	14,15	22,24	22,15	11,94	22,84	22,76	10,95
	3.OG	21,84	22,01	14,1	22,49	22,52	12,56	22,02	21,97	12,52	22,57	22,54	11,36
	4.OG	20,86	21,21	17,44	21,28	21,56	15,71	20,36	20,35	21,12	20,63	20,62	19,92
Renatastr. 23	EG	20,18	21,01	21,87	20,37	21,08	20,6	18,57	18,81	38,83	19,1	19,34	33,47
	1.OG	21,45	21,65	15,03	22,39	22,53	12,92	21,3	21,26	16,15	22,12	22,09	13,22
	2.OG	21,71	21,87	14,32	22,84	22,95	12,91	21,81	21,73	13,62	22,68	22,61	11,42
	3.OG	21,51	21,69	14,74	22,48	22,61	12,73	21,7	21,64	13,62	22,47	22,42	11,52
	4.OG	20,7	21,05	18,15	21,03	21,3	16,54	20,65	20,64	18,71	20,98	20,97	16,97

Objekt		Temperaturschlüsselwerte											
		Konventionelle Heizsystem mit Gas						BTA mit Fernwärme					
		TRY 2015			TRY 2045			TRY 2015			TRY 2045		
		Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %	Mitt. Op.Temp. °C	Mitt. Lufttemp. °C	Mitt. PPD %
Renatastr. 25	EG	20,38	21,11	20,72	20,85	21,45	18,41	18,92	19,05	36,43	19,66	19,8	30,45
	1.OG	21,65	21,81	14,72	22,77	22,87	13,47	21,78	21,7	13,58	22,55	22,46	11,77
	2.OG	21,92	22,06	14,12	23,18	23,27	14,01	22,11	21,99	12,31	22,9	22,79	10,85
	3.OG	21,67	21,84	14,48	22,68	22,8	12,91	21,72	21,66	13,55	22,44	22,39	11,77
	4.OG	20,57	21,01	19,0	20,74	21,08	18,02	19,19	19,15	31,75	19,5	19,47	29,01
Schäringenstr. 22	EG	20,52	21,06	19,41	20,87	21,32	17,6	20,57	20,77	19,2	20,89	21,09	17,55
	1.OG	21,34	21,56	15,41	22,22	22,4	13,32	21,62	21,62	13,7	22,32	22,32	11,89
	2.OG	21,55	21,75	14,78	22,58	22,73	13,1	21,85	21,83	13,02	22,62	22,6	11,33
	3.OG	21,36	21,59	15,28	22,23	22,4	13,21	21,72	21,72	13,37	22,45	22,44	11,63
	4.OG	20,65	21,03	18,43	20,93	21,22	16,99	21,16	21,19	15,47	21,55	21,58	13,99
Schäringenstr. 24	EG	20,16	21,01	22,01	20,33	21,07	20,82	20,43	20,67	20,41	20,79	21,01	18,24
	1.OG	21,38	21,6	15,19	22,24	22,42	12,9	21,13	21,1	17,96	22,03	22,03	14,02
	2.OG	21,57	21,76	14,64	22,6	22,74	12,71	21,81	21,82	13,08	22,5	22,5	11,19
	3.OG	21,37	21,59	15,2	22,23	22,39	12,95	21,6	21,6	13,68	22,2	22,21	11,79
	4.OG	20,64	21,02	18,51	20,88	21,17	17,2	20,45	20,48	20,03	20,65	20,67	18,73
Schäringenstr. 26	EG	20,12	21,0	22,33	20,26	21,03	21,3	20,1	20,36	22,84	20,4	20,65	20,74
	1.OG	21,33	21,56	15,38	22,17	22,34	13,05	21,69	21,7	13,38	22,4	22,41	11,44
	2.OG	21,63	21,82	14,45	22,68	22,82	12,57	21,95	21,94	12,6	22,74	22,73	10,83
	3.OG	21,42	21,64	15,0	22,29	22,45	12,77	21,66	21,67	13,5	22,37	22,39	11,64
	4.OG	20,6	21,02	18,8	20,78	21,1	17,74	20,02	20,05	23,54	20,35	20,38	21,2
Schäringenstr. 28	EG	20,13	21,0	22,2	20,28	21,04	21,14	19,71	19,95	26,49	20,1	20,32	23,45
	1.OG	21,46	21,69	14,95	22,36	22,54	12,77	21,67	21,69	13,76	22,32	22,34	11,7
	2.OG	21,79	21,98	14,05	22,9	23,03	12,65	21,98	21,97	12,62	22,69	22,67	10,83
	3.OG	21,57	21,78	14,58	22,47	22,62	12,49	21,71	21,73	13,55	22,36	22,38	11,56
	4.OG	20,51	21,0	19,36	20,63	21,02	18,57	19,98	20,0	23,94	20,27	20,27	21,73

Die Verschattung wirkt sich nachteilig auf die Behaglichkeit aus. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturen heruntergehen, sobald Verschattungselemente berücksichtigt werden. Demzufolge steigen die PPD-Werte. Die PPD-Werte steigen beispielsweise um ca. 3 % im Erdgeschoss für das TRY 2015.

Eine weitere Variante, eine Wärmepumpe mit Erdwärme und Antriebsenergie Strom in Verbindung mit dem wandintegrierten Heizsystem, wurde in der Referenzwohnung untersucht. Die Vorlauftemperatur des Heizsystems wird in Abhängigkeit der Außentemperatur geregelt. Bis 0 °C Außentemperatur bleibt die Vorlauftemperatur auf 35 °C. Erst dann nimmt die Vorlauftemperatur mit steigenden Außentemperaturen ab und ab 20 °C Außentemperatur liegt die Vorlauftemperatur konstant bei 20 °C.

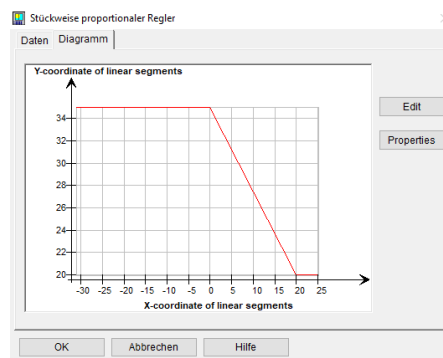


Abbildung 116: Regelung der Vorlauftemperatur (y-Achse) in Abhängigkeit der Außentemperaturen (x-Achse)

Für die Wärmepumpe wurde zur Deckung der Heizlasten eine Wärmeleistung von 15 kW festgelegt. Folgender Energiebedarf, Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen werden aufgenommen.

Tabelle 48: Energetische Kennwerte aller drei Varianten, TRY 2015

	Energetische Kennwerte								
	Konventionelle Heizsystem mit Gas			BTA mit Fernwärme			BTA mit Erdwärme		
	TRY 2015			TRY 2015			TRY 2015		
	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)
Gesamt	6925,1	1662,0	7617,6	5784,8	1209,0	578,5	2042,9	326,9	3677,2
Pro m²	131,0	31,4	144,0	109,4	22,9	10,9	38,6	6,2	69,5

Tabelle 49: Energetische Kennwerte aller drei Varianten, TRY 2045

	Energetische Kennwerte								
	Konventionelle Heizsystem mit Gas			BTA mit Fernwärme			BTA mit Erdwärme		
	TRY 2045			TRY 2045			TRY 2045		
	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)	Endenergie (KWh)	CO ₂ (kg)	Primärenergie (KWh)
Gesamt	5285,6	1268,5	5814,2	4409,3	921,5	440,9	1561,7	249,9	2811,1
Pro m²	99,98	23,0	109,9	83,4	17,4	8,3	29,5	4,7	53,2

Der Endenergiebedarf beträgt für das TRY 2015 38,6 kWh/m² pro Jahr und sinkt um ca. 23 % auf 29,6 kWh/m² für das TRY 2045. Der Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen sinken ebenfalls um ca. 23 % beim Wechseln der Referenzperiode.

Wird die Wärmepumpe mit der Variante 1 und 2 verglichen, kann festgestellt werden, dass der Endenergiebedarf um ca. 70 % gegenüber Variante 1 und um ca. 65 % gegenüber Variante 2 für das TRY 2015 sinkt. Nur noch ca. ein Fünftel der CO₂-Emissionen, die bei Variante 1 emittiert werden, und ca. ein Drittel bei der Variante 2 werden bei der Variante mit Wärmepumpe registriert. Der Primärenergiebedarf sinkt ebenfalls drastisch. Er sinkt um ca. 50 % gegenüber der Variante 1. Im Vergleich zur Variante 2 steigt er hingegen um ca. 80%, weil Fernwärme einen unschlagbaren Primärenergiefaktor von 0,11 hat.

In Tabelle 50 werden die Temperaturschlüsselwerte aller Variante dargestellt. Die niedrigsten Temperaturen sowie die höchsten PPD-Werte kommen bei der Variante mit der Wärmepumpe vor. Der Bereich Bad/WC ist besonders kritisch. Hier beträgt die mittlere Lufttemperatur und operativen Temperaturen jeweils 20,65 und 21,1°C. Somit liegen sie um ca. 4 °C unter der Norm-Innentemperatur von 24 °C. Weiterhin sind die operativen Temperaturen leicht höher als die Lufttemperaturen.

Tabelle 50: Temperaturschlüsselwerte aller drei Varianten

	Temperaturschlüsselwerte																	
	Konventionelle Heizsystem mit Gas						BTA mit Fernwärme						BTA mit Erdwärme					
	TRY 2015			TRY 2045			TRY 2015			TRY 2045			TRY 2015			TRY 2045		
	Mittelwert Op.Temp °C	Mittelwert Lufttemp °C	PPD %	Mittelwert Op.Temp °C	Mittelwert Lufttemp °C	PPD %	Mittelwert Op.Temp °C	Mittelwert Lufttemp °C	PPD %	Mittelwert Op.Temp °C	Mittelwert Lufttemp °C	PPD %	Mittelwert Op.Temp °C	Mittelwert Lufttemp °C	PPD %	Mittelwert Op.Temp °C	Mittelwert Lufttemp °C	PPD %
Wohnzimmer	21,39	21,7	4,93	22,79	23,03	5,47	21,22	21,18	5,33	22,09	22,05	4,74	21,14	21,11	5,57	22,07	22,04	4,81
Schlafzimmer	21,5	21,77	6,64	22,89	23,1	7,22	21,21	21,19	7,72	22,13	22,1	6,82	20,78	20,73	9,74	21,81	21,86	8,03
Bad/WC	24,11	24,64	1,39	25,07	25,49	2,42	21,47	21,45	3,52	22,38	22,36	3,17	20,65	20,61	5,31	21,82	21,78	4,26
Küche	21,94	22,12	3,41	23,35	23,47	5,50	21,51	21,46	3,96	22,4	22,36	3,70	21,14	21,1	4,74	22,15	22,19	4,04
Flur	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

9.2 Interpretation der Staubbelastungs-Messungen während der Schlitzarbeiten

Um die Umbaumaßnahmen in einem bewohnten Zustand durchzuführen, spielt die Staubentwicklung eine wichtige Rolle. Die Messungen haben gezeigt, dass eine Staubschutzwand unabdingbar ist. Auch das Öffnen des Reißverschlusses lässt die Staubmassenkonzentration außerhalb der Staubschutzwand rasch ansteigen. Demnach wäre zum Schutz der Handwerker im bewohnten Zustand ein Abluftgerät, welches den entstehenden Staub nach außen aus dem Staubbereich führt, unabdingbar.

Das Aufhängen einer Folie in der Tür, bzw. der Türöffnung bei den Schlitzarbeiten außerhalb der Staubschutzwand hat keine Wirkung gezeigt. Die gemessenen Staubmassenkonzentrationen im Flur waren sehr hoch und haben sich bis zum Verlassen der Wohnung auf hohem Niveau gehalten ($>2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Das Reinigen der Baustelle, wobei auch trocken gefegt wurde, wodurch der Staub zusätzlich aufgewirbelt wurde, hat vermutlich dazu beigetragen, dass keine Besserung der Werte erfolgte.

Nach den Arbeiten wurde der Handwerker befragt, der die Schlitzarbeiten durchführte. Nach dessen Aussage ließ sich das freigelegte Mauerwerk schlechter schlitzen, da die Oberfläche sehr uneben ist, sich das Gerät schlecht führen ließ und sich die Staubentwicklung verstärkte. Eine Option zur Staubreduktion sei das nasse Schlitzen, dadurch entstehe jedoch mehr Dreck am Boden, durch das ablaufende Wasser. Im bewohnten Zustand müsste man 1,2 m vor der Wand die Staubschutzwand aufstellen, dann wäre eine Belüftung notwendig (Ablufteinheit).

Während der Arbeiten in der Versuchswohnung waren 2 bis 3 Handwerker beschäftigt. Ein Arbeiter hat die Schlitzarbeiten ausgeführt, ein weiterer war für das Herausstemmen zuständig (indessen der 1. Handwerker frische Luft atmete). Ein dritter hat beim Abtransport des entstehenden Schutts geholfen. Die Staubschutzwand hat die Staubbelastung erheblich reduziert, dadurch ist diese unabdingbar. Weiterhin muss ein Abluftgerät die Staubbelastung für den Arbeitenden reduzieren. Als weitere Option ist das nasse Schlitzen eine Methode, um die luftgetragenen Staubpartikel zu reduzieren. Das hat eine erhöhte Dreckbildung am Boden zur Folge.



Abbildung 117: Detailaufnahme Schlitz; Entstehender Abfall (Schutt); Gesamtansicht Wohnzimmer-Außenwand mit Schlitzen

Die Aufstellung der Staubschutzwand für die Schlitzarbeiten, sollte in den Sanierungsmaßnahmen ebenfalls genutzt werden, um alte undichte Fenster mit hohem U-Wert auszutauschen.

9.3 Interpretation der Thermografie-Aufnahmen Analyse

Bei einer standardisierten Berechnung der Heizlast wird von einer homogenen Raumlufttemperatur von 20 °C ausgegangen. Die Realität zeigt jedoch eine weitaus höhere Temperatur an der Innenseite der Außenwand hinter dem Heizkörper, was lokal zu hohen Transmissionswärmeverlusten führt. Diese höheren Transmissionswärmeverluste sind auch in den Thermografie-Aufnahmen zu sehen. Von außen sieht man den warmen Bereich, hinter welchem der Heizkörper montiert ist. Beim Betrieb der thermischen Außenwandaktivierung sieht man auch hier die Bereiche, in welchen die Heizleitungen entlangführen. Die Erwärmung der Außenwand ist klar sichtbar.

Die Aufnahmen vom 15.02.2021 zeigen bei Außenlufttemperaturen von weniger als -5 °C in dem Versuchsraum mit aktivierter Außenwand angenehme Oberflächentemperaturen von etwa 20 °C mit Ausnahme des Brüstungsbereichs, wo keine Heizleitungen integriert wurden. In dem Vergleichsraum mit konventionellem Heizkörper werden Oberflächentemperaturen von etwa 16 °C erreicht. Die Oberflächentemperaturen am Heizkörper betragen knapp 50 °C. Abbildung 12 zeigt gerade bei einer kühlen Außenwand bezüglich der Strahlungsasymmetrie eine höhere Prozentzahl Unzufriedener.

9.4 Interpretation der Ergebnisse zur Temperaturverteilung und der Energiemengenzählung

Der Vergleich der beiden Heizsysteme zeigt, dass im Schlafzimmer die kältesten Temperaturen in Außenwandnähe herrschen. Im Wohnzimmer herrschen dort die wärmsten Temperaturen, da sich dort die Heizleitungen der Außenwandtemperierung befinden. Im

Wohnzimmer herrschen die kältesten Temperaturen nahe des Brüstungsbereiches bzw. des Fensterbereiches, da hier keine Heizmöglichkeit realisiert wurde und nur die Außenwandtemperierung alleinstehend getestet wurde. Die vertikale Temperaturschichtung zeigt sich vor allem im Raum mit Heizkörper (Temperaturgradient bis zu 2 K).

Die Energiemengenzählung erfolgte mittels Temperatursensoren im Vor- und Rücklauf des Nieder- und Hochtemperaturkreislaufes und jeweils einem Volumenstromsensor. Da in der Versuchswohnung nur eine geringe Wärmemenge von der Gastherme abgenommen wird, muss die Anlage sehr oft Takten. Die Vorlauftemperatur fluktuiert also relativ stark innerhalb weniger Minuten. Dies kann zu Ungenauigkeiten in der Energiemengenberechnung führen. Die Temperaturen des Heizmediums werden mittels Tauchhülsen gemessen. Auch hier kann es zu Messfehlern kommen. Die Ergebnisse zeigen jedoch einen relativ geringen Wärmemengenbedarf im Wohnzimmer. Der flächenspezifische Wärmemengenbedarf im Schlafzimmer mit konventionellem Heizkörper lag im März 2020, in dem Zeitraum, wo der Volumenstromsensor noch funktionierte, über dem der thermischen Außenwandaktivierung. Diese Auffälligkeit sollte in weiteren Messungen überprüft werden.

Anhand der großen Temperaturspreizung bei dem Hochtemperaturkreislauf (etwa 17 K) lässt sich erahnen, dass der Volumenstrom recht klein sein muss, da sich somit die Fluidtemperatur stärker abkühlt am Punkt der Temperaturmessung des Rücklaufs. Wahrscheinlich war der Volumenstrom so gering, dass der Volumenstrom keine Messwerte erfassen konnte, da die Regelung bauartbedingt keine zwei gleichen Volumenstromsensoren integrieren können und im Hochtemperaturkreislauf der Sensor mit dem nächsthöheren Messbereich (2 bis 40 l/min) verbaut wurde. Auf Nachfrage beim Hersteller hieß es, es können auch kleinere Ströme aufgezeichnet werden, was scheinbar nicht der Fall war. Da der Volumenstrom für den Hochtemperaturkreislauf nur angenommen werden konnte. Sollten hier weitere Messungen durchgeführt werden mit optimiertem Volumenstromsensor, um so validere Aussagen zum Energiebedarf treffen zu können.

9.5 Interpretation der Messergebnisse zur Behaglichkeit

Für die Behaglichkeitsuntersuchungen wurden verschiedene Messwerte aufgenommen (Luftgeschwindigkeit, Strahlungstemperatur, Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit) und nach DIN EN ISO 7730 berechnet. Für die Messung der Luftgeschwindigkeit wurden ausgewählte Messpunkte des Temperatur-Messrasters verwendet. Eine höhere Luftgeschwindigkeit als 0,01 m/s wurde nicht gemessen. Auffällig ist die niedrige relative Luftfeuchtigkeit, was daran liegt, dass es keinerlei Feuchtigkeitsquellen in der Wohnung gibt. Im Wohnzimmer fehlte die individuelle Möglichkeit zum Zuheizen, welcher die

thermische Behaglichkeit verbessern würde. Die Temperaturverteilung im Raum erscheint bei der thermischen Außenwandaktivierung behaglicher. Im Raum mit Heizkörper ist der Fußbereich kälter als der Kopfbereich, da die warme Luft nach oben steigt.

9.6 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Wohngebäudebestand

Die Maßnahmen und Untersuchungen des EffTecSo Projekts wurden an den Außenwänden einer repräsentativen Wohnung im 3. OG des Wohngebäudes vorgenommen, welches sich in einem heterogenen Wohnquartier in München befindet.

Der Wohnblock wurde in massiver Bauweise errichtet mit tragenden, einschaligen Vollziegelwänden. Die Versuchswohnung ist mitten im historischeren Altbau positioniert, welcher in der Zeitspanne von 1910 bis 1914 errichtet wurde [97] und kann entsprechend, als zeittypischer Altbau kategorisiert werden.

Die Untersuchungen des EffTecSo Projekts zu aus der Versuchswohnung liefern Ergebnisse, die auf dieser Gebäudetypologie übertragen werden können unter Beachtung der Hinweise zur Ausführung der Maßnahmen. Hierfür werden die bauphysikalischen Grundlagen und die historische Baugesetzgebung und Normung für den entsprechenden Zeitabschnitt berücksichtigt. Diese Grundlage ermöglicht eine Prognose des Gebäudevolumens, das ähnliche Voraussetzungen für die Übertragbarkeit von Versuchs- und Messergebnissen aus einer Musterwohnung aufweist.

In der Musterwohnung wurden Wand Beprobungen an mehreren Stellen unternommen. Dabei wurden Vollziegel aus Kalkstein entnommen. Bei den Untersuchungen wurden Ziegelmaße mit: 250 x 119 x 63 mm nachgewiesen. Diese entsprechen den zeitbautypischen Ziegelformaten und sind vergleichbar mit dem später genormten Reichsformat: 250 x 120 x 65 mm, welcher hauptsächlich im Altbau eingesetzt wurde. [98]

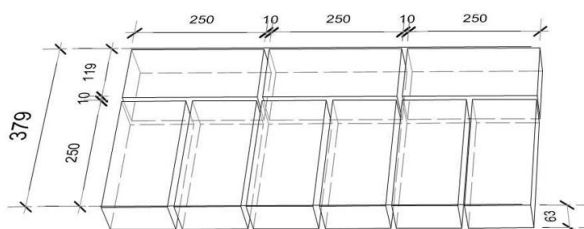


Abbildung 118: Vollziegel im Reichsformat

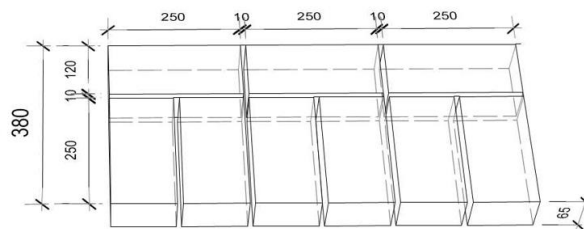


Abbildung 119: Vollziegel Format im Renatablock

Bei der Kategorisierung und Bewertung von Außenwänden für den Einsatz der Wandaktivierung wird eine Außenwanddicke von 38 cm, einschalig gemauert in Vollziegelbauweise als Mindestanforderung betrachtet. Da die Ziegelbauweise in Deutschland ab 1850

wurde auf Grund ihrer Vorteile beim Brandschutz, Regenschutz, der Beständigkeit und Kostenreduzierung durch die maschinelle Produktion immer beliebter und ist größtenteils mit ca. 60% im Wohnungsbau vertreten.

Die 38 cm dicke Ziegelwand wurde als „Normalwand“ im Wohnungsbau bezeichnet, basierend auf dem Normformat der Steine, die im 19. Jahrhunderts in unterschiedlichen Verbände aber mit mindestens immer 1 ½ Stein Dicke ausgeführt werden mussten. Die damalige Ausführung richtete sich an den zeitlichen geltenden Bauordnungen, Bestimmungen und Normen. Für den Renatablock greift die Allgemeine Bauordnung für die Haupt- und Residenz- Stadt München vom 2. Oktober 1863 [98], sowie die verbindlichen Bestimmungen und Normen für Deutschland und Richtlinien der Baupolizei von 1937-1943. Durch die DIN 4106 wurden die Richtlinien für Mauerwerk aus Ziegeln und Kalksandstein der Wohnungsbauten und statisch ähnlichen gebauten Mauern mit einer Dicke für Umfassungswände mit min. 38 cm bestimmt. Die DIN 4106 definierte erstmals die Grundlagen für die Anforderungen an Wanddicken nach Klimazonen und bildete die Grundlage der ersten Mindestanforderungen für den Wärmeschutz im Hochbau, die 1952 mit der DIN 4108 Richtlinien für den Wärmeschutz im Hochbau entstanden. [99]

Zwischen 1900 und 1950 wurden Städte daher hauptsächlich mit dieser Massivbauweise erweitert und umgebaut. Die Ziegelbauweise hatte dabei den höchsten Marktanteil von etwa 85% bei den Mauerwerksbaustoffen. Ab etwa 1950 wurde der Vollziegelstein durch den Hohlziegel mit größerem Format ersetzt.

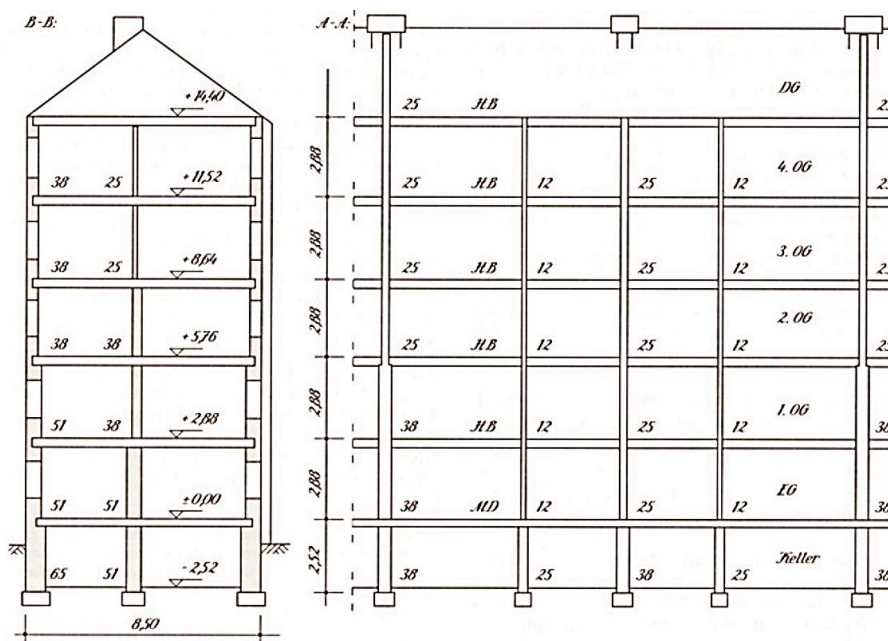


Abbildung 120: Wohnhaus Bautyp Altbau 1950 deckentragende Längswände mit 38-65 cm Außenwanddicken [98]

In Deutschland gibt es insgesamt etwa 19 Millionen Wohngebäude. Circa 2,65 Millionen dieser Immobilien stammen aus der Zeit von 1850 bis 1919 und sind größtenteils 3- bis 6-geschossige Mehrfamilienhäuser. Zwischen 1919 und 1949 wurden noch weitere etwa 2,4 Millionen Gebäude errichtet. Insgesamt gibt es in Deutschland bis 1949 circa 5,05 Millionen errichtete Wohngebäude. Ab 1950 wurde vermehrt leichtes Mauerwerk im Wohnungsbau verwendet. [99]

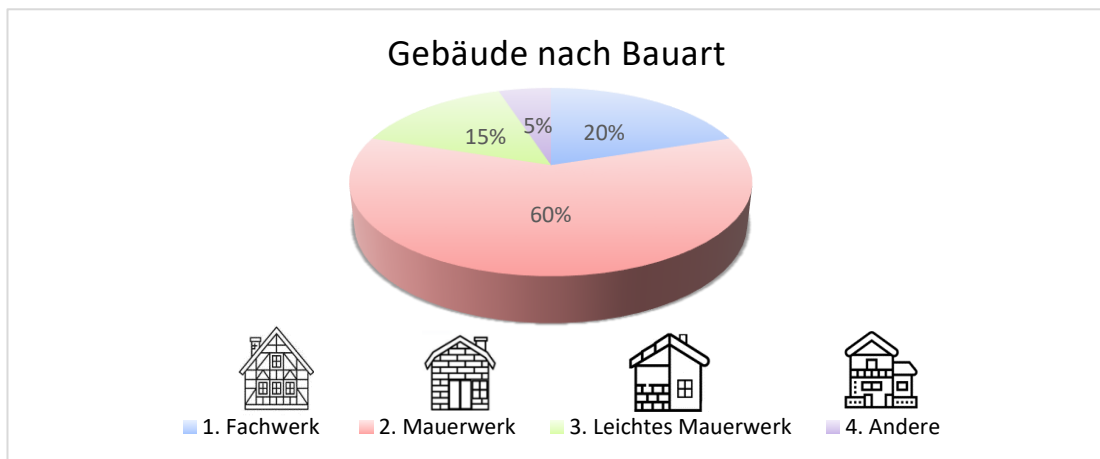


Abbildung 121: Gesamtzahl der Gebäude nach Bauart 1850- 1968 [101]

Entsprechend der Bauvorgaben zwischen 1890 bis 1950 und der hauptsächlichen Einsetzung von Vollziegel als bevorzugtes Baumaterial im Wohnungsbausektor, kann davon ausgegangen werden, dass etwa 60% der Altbauten in einer Vollziegelbauweise ausgeführt wurden mit einer einschaligen Mauerwerkstärke von 38 cm. Daraus ergibt sich eine Anzahl von circa 3,02 Millionen Wohngebäuden, die entsprechend ihrer Typologie und bauphysikalischen Eigenschaften der Wände, sich grundsätzlich für die Übertragung der Ergebnisse aus Versuchswohnungen eignen für den Einsatz einer Wandaktivierung. Bei einer weiteren Betrachtung müssen jedoch die entsprechenden Rahmenbedingungen für jedes Objekt einzeln statisch geprüft und eingehalten werden.

Die Untersuchung ergibt, dass es noch weitere Wandtypen gibt, wie Lochziegelwände, Naturstein- oder Verblendmauerwerke, die durch weiterführende Untersuchungen auch in Betracht gezogen werden können zur Übertragung der Ergebnisse aus der Musterwohnung.

Im Wohnungsbau wurden durch die DIN 4106 von 1937 [98] einerseits die Wanddicken genau definiert, jedoch bestand eine Vielfalt an Ausführungsweisen in Bezug auf die Wandschichtung. Es wurden Außenwände mit Mauersteinen oft so ausgemauert, dass sie luftgefüllte Hohlräume in unterschiedliche Ausführungsarten enthielten. Durch die abgeschlossen oder offenen Luftschichten sollte der Wärme- oder Feuchtigkeitsschutz verbessert oder Materialien eingespart werden. Eine Beprobung des Wandaufbaus sollte bei jeder Umbauplanung berücksichtigt werden und vor der Sanierung vorgenommen werden,

um den tatsächlichen Bestandsaufbau über alle Geschosse zu prüfen, da unterschiedliche Positionierungen der Hohlräume in einem Gebäude auftreten können. [98]

Die Außenwände werden zum Einbau der Wandheizungsleitungen auf der Innenseite 8,5 cm tief geschlitzt. Die Parameter zu den Leitungslängen, deren Positionierung und Abstände müssen für jede zu aktivierende Wand einzeln berechnet, geplant und geprüft werden. Für alle vertikale, horizontale und schräge Schlitz- und Aussparungen, die nachträglich in dem Mauerwerk erstellt werden, sind die zulässigen Größen, die ohne Nachweis erstellt werden, aus der DIN EN 1996-1-1/NA zu entnehmen. Außerhalb dieser Normgrößen dienen die statischen Berechnungen zur Standsicherheit als Grundlage. [100] Die Parameter zur genauen Positionierung und Länge der Wandheizungsleitungen werden auf diese Grundlage erstellt.

9.7 Klassifizierung der Gebäudeklassen

Die Klassifizierung des Gebäudebestands bietet verschiedene Ansätze für die Erarbeitung von Leitpläne, die analog oder ähnlich für die gleiche Klassifizierung angewendet werden könnten.

Die Zuordnung eines Gebäudes in einer Typologie bietet die Möglichkeit einen geeigneten Leitfadens zu finden und die entsprechende Herangehensweise zum Umgang mit der Bestandsimmobilie im Vorfeld zu prüfen.

Die Klassifizierung der Gebäudeklassen tragen zur ordnungsgemäßen Planung, Sanierung und Nutzung der Gebäude bei mit der Zielsetzung die Sicherheit der Menschen zu gewährleisten, die Umwelteinwirkungen und die Kosten zu minimieren und die Sanierungsmaßnahmen zu optimieren. Dazu gibt es verschiedene Klassifikationsmöglichkeiten für Gebäude.

Klassifikation nach Gebäudeklasse

Die Zuordnung nach Gebäudeklassen spezifiziert Gebäude in Bezug zu ihrer Höhe, Größe und Nutzungsart. Diese Zuordnung ist entscheidend bei der Notwendigkeit zur Beantragung einer Baugenehmigung und bei der Beurteilung zum baulichen Brandschutz. Für die Versuchswohnung in der Renatastraße 17, im Wohnquartier Renatablock München und den entsprechenden Umbaumaßnahmen ist die Bayerische Bauordnung (BayBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007 (GVBl. S. 588) BayRS 2132-1-B gültig. [103] Die Versuchswohnung ist in die Gebäudeklasse 5 zu kategorisiert. Generell sind alle Umbau- und Sanierungsmaßnahmen für diese Gebäudekategorie genehmigungsrelevant und mit dem zuständigen Bauamt abzusprechen, sobald ein tragendes Bauelement wie die Außenwand betroffen ist, oder brandschutzrelevante Maßnahmen erforderlich werden.

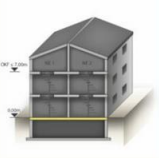
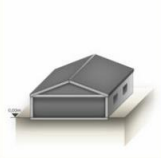
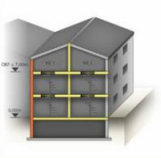
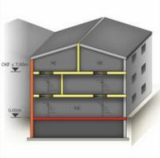
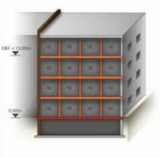
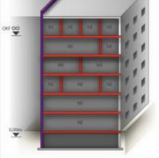
GK 1a	GK 1b	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
					
<ul style="list-style-type: none"> feuerhemmend NE ≤ Nutzungseinheit (Brutto Grundfläche) 		<ul style="list-style-type: none"> feuerhemmend von innen nach außen feuerhemmend und von außen nach innen feuerbeständig 	<ul style="list-style-type: none"> feuerhemmend feuerbeständig von innen nach außen feuerhemmend und von außen nach innen feuerbeständig 	<ul style="list-style-type: none"> hochfeuerhemmend feuerbeständig Wand unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung hochfeuerhemmend 	<ul style="list-style-type: none"> feuerbeständig Brandwand unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung feuerbeständig
<ul style="list-style-type: none"> freistehende Gebäude OKF ≤ 7m ≤ 2 Nutzungseinheiten Σ NE ≤ 400m² ohne UG 	<ul style="list-style-type: none"> freistehende Gebäude land- und forstwirtschaftliche Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> nicht freistehend OKF ≤ 7m ≤ 2 Nutzungseinheiten Σ NE ≤ 400m² ohne UG 	<ul style="list-style-type: none"> sonstige Gebäude OKF ≤ 7m ≤ 2 Nutzungseinheiten + NE > 400m² 	<ul style="list-style-type: none"> OKF ≤ 13m Σ NE ≤ 400m² ohne UG 	<ul style="list-style-type: none"> OKF ∞ NE > 400m²
Feuerwehreinsatz mit Steckleiter möglich				Feuerwehreinsatz mit Drehleiter nötig	
Höhe im Sinne des Satzes 1 ist das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel.					

Abbildung 122: Übersicht der Gebäudeklassen (© Cornelia Halbach)

Klassifikation nach Nutzungsart

Die Zuordnung nach Nutzungsart ist vor allem bei Umnutzungskonzepten von Bestandsgebäude relevant, denn eine Nutzungsänderung ist bauantragspflichtig.

Die Versuchswohnung befindet sich in einer mehrgeschossigen Blockrandbebauung. Das Mietshaus wird hauptsächlich als Wohngebäude genutzt. Die Maßnahmen und Untersuchungen für die Wandaktivierung wurden in eine Leerwohnung vollzogen. Die Untersuchungen berücksichtigen einen Umbau im bewohnten Zustand und beinhalten damit Staub- und Lärmmessungen, sowie den Einsatz einer Staubschutzwand.

Bei der Erstellung von geeigneten Leitpläne sind für Wohngebäude der Umgang mit dem Mieter, rechtzeitiges Informieren, sowie partizipative Ansätze zu beachten und in die Planung und Umsetzung miteinzubeziehen.

Klassifikation nach Bauweise

Die Kategorisierung nach Bauweise ermöglicht eine Zuordnung der genutzten Materialien und deren bauphysikalischen Eigenschaften und gibt eine Aussage über die zu Grunde liegende Tragstruktur.

Der Renatablock wurde zwischen 1910-1914 [97] in massiver Ziegelbauweise errichtet. In der Versuchswohnung in der Renatastraße 17 im 3. Obergeschoss wurden Wandbehebungen mit Vollziegel entnommen, die auf einschalige Vollziegelwänden schließen lassen.

Leitfäden

Die Klassifizierungen der Gebäudeklassen sind entscheidend bei der Definition der baurechtlichen Vorschriften für die Sanierung, Nutzung und in Betriebsnahe. Um die Ener-

gieffizienz und Nachhaltigkeit von Gebäuden zu bewerten und die Umsetzung nachhaltiger Sanierungsmethoden umsetzen zu können, ist eine Klassifizierung des Gebäudebestands notwendig.

Zu den Grundpflichten bei der Sanierung oder Umbau der baulichen Anlagen sind der Bauherr und im Rahmen ihres Wirkungskreises die anderen am Bau Beteiligten dafür verantwortlich, dass die öffentlich-rechtlichen Vorschriften eingehalten werden: [101]

9.8 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wird anhand der VDI 2067 Blatt 1 ermittelt. Da bei ist die Annuitätsmethode unter Berücksichtigung von eventuellen Ersatzbeschaffungen die gängigste Variante. Die Kosten sind dabei in einmalige und laufende Kosten unterteilt, wodurch folgende Kostengruppen entstehen:

- Kapitalgebundene Kosten
- Bedarfsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten
- Sonstige Kosten

In diesem Projekt werden nur die kapitalgebundenen Kosten betrachtet, da keine genauen Energieerzeuger gegenübergestellt wurden. Die Betrachtung wurde auf die Wandaktivierung in einer Wohnung fokussiert. Um die bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten mit aufzustellen können wäre eine umfangreichere Betrachtung notwendig gewesen. Aus diesem Grund werden nur die Kapitalgebunden Kosten hier dargestellt und deren Wirtschaftlichkeit betrachtet. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird über einen Zeitraum von 20 Jahren betrachtet. Die Kalkulation der Kosten wurde am 17.12.2020 mit den für München üblichen Kosten fertiggestellt.

Für die Betrachtung der Kosten werden die Durchschnittswerte aus der VDI 2071 verwendet, da diese bei einer möglichen Umsetzung vereinbart werden müssten und nach heutigem Stand noch nicht definiert sind. Dies wären folgende Punkte:

- Nutzungsdauer
- Aufwand der Wartung
- Instandhaltung
- Bedienung
- Zinsfaktor

Tabelle 51: Kostenberechnung

lfd. Nr.:	Anzahl	Einheit	Position	E-Preis € (netto)	G-Preis € (netto)
KGR 420 Heizung					
Wohnungsstation					3.242,50
1-01	1	St.	Oventrop Wohnungsstation "Regudis W-HTF" 15l/min	2.504,00	2.504,00
1-02	1	St.	Oventrop Kugelhahnanschluss-set "Regudis W-HTF"	195,50	195,50
1-03	1	St.	Oventrop Kugelhahnanschluss-set "Regudis W-HTF" HAT-Abgang	55,90	55,90
1-04	1	St.	Oventrop Kheizkreisregler "Regtronic RH" mit 4 Fühlern	331,90	331,90
1-05	1	St.	Oventrop Elektromotorischer Stellantrieb Aktor M 3P H	155,20	155,20
Rohrleitungen					1.436,84
1-06	26	m	Rohrleitungen aus C-Stahl inkl. Formteile	35,00	910,00
1-07	4	m ²	Dämmung Armaflex	7,71	30,84
1-08	40	m	Rehau Rautherm S Rohr	3,00	120,00
1-09	25	St.	Rehau Rautherm S Rohrführungsbogen	3,20	80,00
1-10	5	St.	Rehau Rautherm S T-Stück	12,00	60,00
1-11	10	St.	Rehau Rautherm S Übergang mit Außengewinde	10,30	103,00
1-12	50	St.	Rehau Rautherm S Schiebehülse	1,40	70,00
1-13	4	St.	Rehau Rautherm S Übergang Rp SDR 11 LX	9,15	36,60
1-14	4	St.	Rehau Rautherm S Klemmringverschraubung	6,60	26,40
1-15	1	St.	Inbetriebnahme der Heizungsanlage (Druckprüfung, Befüllung, usw.)	115,40	115,40
Stundenlohnarbeiten					2.289,60
1-17	48	Std.	Montage und Inbetriebnahme der Wandaktivierung	47,70	2.289,60
1-00	Zwischensumme				6.968,94
H O C H B A U (Schlitzarbeiten)					
Stundenlohnarbeiten gesamt					1.948,50
2-01	3	Std.	Meisterstunde	44,00	132,00
2-02	14	Std.	Vorarbeiter	42,00	588,00
2-03	14	Std.	Facharbeiter	40,00	560,00
2-04	3	Std.	Transporter ohne Fahrer	24,50	73,50
2-05	8	Std.	Betonsachneider	57,50	460,00
2-06	2	Std.	Axialventilator	30,00	60,00
2-07	5	Std.	Schlitzfräse	15,00	75,00
Materialkosten (Staubschutzwand)					127,76
2-08	60	m ²	Folie	0,46	27,60
2-09	2	Rolle	Klebeband	5,78	11,56
2-10	40	lfm	Dachlatten	0,69	27,60
2-12	1	Stck.	Folientüre	61,00	61,00
2-00	Zwischensumme				2.076,26
Gesamtkosten Installation dr Wandaktivierung in einer Wohnung					9.045,20

Der Energiebedarf für die Renatastraße 17 beträgt 183,1 kWh/m². Somit würde sich für die Laborwohnung die eine Größe von 56m² hat, ein jährlicher Energiebedarf von 10813,6 kWh ergeben. Die Simulation des Energiebedarfs ist in dem Kapitel 9.1 dokumentiert.

Kapitalgebundene Kosten: 9045,20 €

Armortisationszeit: 20 Jahre

Fernwärme Preis 0,091 €/KWh

$$x = \frac{9045,20\text{€}}{20 \text{ Jahre} \cdot 0,091 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}$$

$$x = 4969,89 \text{ kWh/Jahr}$$

Durch die neue Installierte Außenwandaktivierung und den energieerzeuger müssen 4969,89 kWh pro Jahr eingespart werden, damit die Investition sich innerhalb der 20 Jahre amortisiert. Das entspräche einer Halbierung des Wärmeenergiebedarfs.

10 Wissenstransfer

Die Ergebnisse des EffTecSo-modIn sind auf der Internetseite: www.efftecso-modin.de beschrieben und publiziert. Die Ergebnisse werden ebenfalls in Form von Flyer, Informationsbroschüren, Vorträgen bei Fachkonferenzen, Workshops, sowie Artikeln, Poster und Publikationen veröffentlicht und publiziert. Alle Projektinformation sowie die Ergebnisse des Vorhabens finden auch durch Open Source Software weitere Verbreitung. Außerdem wird eine Wissensplattform für das Projekt durch das Fraunhofer IRB eingerichtet und für die breite Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Unterstützt wird die Projektarbeit durch begleitende Bachelor- und Masterarbeiten. Es findet ein direkter Wissenstransfer in die Lehre der Hochschule durch die Professur von Frau Prof. Dipl.-Ing. Biek statt.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Von den 8760 Stunden, die ein Jahr hat, fällt die Temperatur in München (Deutschland) in nur 174 Stunden unter -5 °C (Nach dwd / Testreferenzjahr Datensatz 2017. Für das prognostizierte Jahr 2045, welches als Referenz für den Zeitraum 2030 und 2060 dienen soll, sind es sogar nur noch 36 Stunden. Das Projekt EffTecSo-modIn setzt genau an diesem Punkt an. Mit der Temperierung der Außenwand soll das Wohnhaus zu 98 % (Tendenz steigend) der Zeit im Jahr bei niedrigen Vorlauftemperaturen mit Wärme versorgt werden und in den kälteren Stunden die zusätzliche Heizung unterstützen.

Hinsichtlich des Bestandsschutzes erfüllt die thermische Außenwandaktivierung ihren Zweck. Durch die Trocknung des Bauteils wird mikrobielles Wachstum, Frost und Salzkristallisationswechsel vermieden. Auch die Wärmeleitfähigkeit senkt sich durch die Austrocknung der Außenwand etwas. Durch die in der Wand liegenden Heizleitungen erhöht sich jedoch naturgemäß die Wärmeleitung an die Außenluft etwas [102].

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine enorme Reduzierung des Energiebedarfs, allein durch die Außenwandaktivierung nicht erfolgt. Erst durch die Kopplung mit einem regenerativen Energieträger kommt es zu großen CO_2 -Emissions-Einsparungen. Da die Außenwandaktivierung mit geringen Vorlauftemperaturen $\leq 35\text{ °C}$ betrieben werden, eignet sich das System, um alte Gebäude mit Wärmepumpen auszustatten, welche dann auch effizient betrieben werden können. Die Analyse der Wetterprognosen zeigt, dass die Außenlufttemperaturen nur noch in wenigen Stunden des Jahres unter -5 °C fallen, wodurch theoretisch eine geringere Heizleistung installiert werden kann.

In zukünftigen Untersuchungen könnten gerade in Verbindung mit einer Luft/Luft Wärmepumpe weitere Regelstrategien getestet werden. Dabei wäre eine außenlufttemperaturabhängige Regelung vorstellbar, wodurch die Wärmepumpe zu den Zeiten der höchsten Außenlufttemperatur arbeitet und damit die Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages ausgenutzt werden. Somit wird die thermische Speicherkapazität der Außenwand genutzt.

Durch die thermische Außenwandaktivierung wird also ein System geschaffen, welches ein modulares Instandsetzungsverfahren erlaubt, die Einbindung regenerativer Energieversorgung ermöglicht und die Behaglichkeit erhöht. Es bietet zudem in Verbindung mit einer Wärmepumpe die Möglichkeit der Kühlung, indem beispielsweise nachts, bei geringeren Temperaturen, die Außenwände mit kaltem Wasser zusätzlich runtergekühlt werden (unter Berücksichtigung des Taupunkts). Dieser Untersuchungsaspekt muss in einem weiteren Vorhaben untersucht werden.

In Gebäuden, in denen eine Außendämmung realisierbar ist, ist das System ebenfalls kombinierbar. Dadurch könnte der Endenergiebedarf deutlich gesenkt werden.

Nach Beendigung der Versuchsphase müssen Maßnahmen- und Anforderungskataloge erstellt werden. Für die Verbreitung der Technologie sind Fragebögen für Immobilienverwaltungen und generelle Umfragen interessant. Auch durch Workshops und Datenblätter kann das Interesse geweckt werden. Für die Bildung von Kennzahlen und eines Kriterienkatalogs mit Bezifferung des Machbaren für die Modellphase ist das Monitoring der Bauphase signifikant, um entstehende Probleme in zukünftigen Vorhaben zu vermeiden. Das Monitoring der Nutzung birgt weiteres Optimierungspotential, da individuelle Nutzungen individueller Konzepte bedürfen. Auch müssen Standortparameter einbezogen werden. Dabei führen standardisierte Analysemethoden zu effizienten Lösungen. Allgemein kann man sagen, dass Technik gut ist, wenn sie dem Menschen nutzt.

VI Literaturverzeichnis

- [1] Die Bundesregierung: Hintergrundpapier zur „Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045“. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.
URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebäudestrategie-klimaneutralitaet-2045.html> [Abruf: 09.10.2023]
- [2] Schlussbericht „LEXU“: Energiespar- und Kostenpotenziale durch den Einsatz von außen liegenden Wandheizsystemen (aWH) für Niedertemperaturanwendungen; Förderkennzeichen: 0327370T
- [3] Schlussbericht „GeoSol“: Optimierung der Energieflüsse zwischen Geothermie und Solarthermie, Test und Simulation, Förderkennzeichen: 0327364C
- [4] Stadtwerke München: M/Fernwärme.
URL: <https://www.swm.de/geschaeftskunden/fernwaerme> [Abruf: 09.10.2023]
- [5] GEG, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr.37, ausgegeben zu Bonn 13. August 2020, S. 1745-51
- [6] Statisches Bundesamt (Destatis): Bevölkerung im Wandel. Annahmen und Ergebnisse der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung.
URL: <https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2019/Bevoelkerung/pressebroschuere-bevoelkerung.pdf> [Abruf: 27.07.2023]
- [7] Die Wohnungswirtschaft Deutschland: Schwarmstädte in Deutschland. Ursachen und Nachhaltigkeit der neuen Wandlungsmuster. Endbericht.
URL: https://www.bid.info/wp-content/uploads/2016/09/GdW_Schwarmstaedte_voll.pdf [Abruf: 27.07.2023]
- [8] Deutsche Energy Agentur: Dena-Gebäudereport, Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand.
URL: https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf [Abruf: 27.07.2023]
- [9] Statista Research Department: Anteil der Wärmepumpen im Wohnneubau in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2021.
URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/237364/umfrage/bedeutung-der-waermepumpen-im-neubau-in-deutschland/> [Abruf: 27.07.2023]
- [10] BWP 2020: Wärmepumpenabsatz 2019; BDH 2021: Marktentwicklung Wärmeerzeuger Deutschland 2011–2020
URL: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatzzahlen/> [Abruf: 10.10.2023]
- [11] Cali, Davide; Osterhage, Tanja: Energy Performance Gap. Erfahrungen mit sanierten Wohnungen - Teil 1. In: Tab Das Fachmedium der TGA-Branche (2016), Jg. 47, Nr. 11, S. 70–75

- [12] Hochradl, Daniela: "Performance Gap" - ein mehrdimensionaler Begriff steht zur Diskussion. Erkenntnisse der "ParkGap"-Studie des Bundesamtes für Energie (BFE). In: HK Gebäudetechnik (2019), Jg. 17, Nr. 1, S. 8–10
- [13] Vogel, Benedikt: Energetisch wirkungsvoll sanieren. Performance Gap: Fachartikel über das Forschungsprojekt Compare Renove (optimal Sanieren) der Uni Genf. In: HK Gebäudetechnik (2018), Jg. 16, Nr. 7, S. 14–18
- [14] DIN V 4108-6, Ausgabe: 2003-06
- [15] Bundesministerium der Justiz: Genossenschaftsgesetz (Gesetz betreffend die Erwerbs- und Wirtschaftsgenossenschaften).
URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/genfg/> [Abruf: 10.10.2023].
- [16] Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V.: Genossenschaften.
URL: <https://web.gdw.de/der-gdw/unternehmenssparten/genossenschaften> [Abruf: 27.07.2023]
- [17] Isarwatt eG. URL: <https://www.isarwatt.de> [Abruf: 11.09.2023]
- [18] Google Earth. URL :https://www.google.com/intl/de_de/earth/ [Abruf : 11.09.2023]
- [19] Giffinger et al.: E_PROFIL - Quartiersprofile für optimierte energietechnische Transformationsprozesse, In: Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 9/9a/2017, Wien: Bundesministerium für Verkehr und Technologie
- [20] Langenbrink et al.: KfW-Programm 432 "Energetische Stadtsanierung - Zuschüsse für integrierte Quartierskonzepte und Sanierungsmanager". Ergebnisse der Begleitforschung (2017). Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
- [21] Bahner et al.: Energetische Sanierung: Denken im Quartier. Berlin: Bund Deutscher Architekten (2012)
- [22] Geissler-Frank, Isolde; Schuhmacher, Birgit; Söhnen, Sarah: Analyse der sozialen Probleme älterer Bewohner/innen im Geschosswohnungsbau vor, während und nach energetischen Sanierungen und Erarbeitung von Lösungsvorschlägen. Stuttgart:Frauenhofer IRB Verlag (2017)
- [23] Krause, Ellen: Bad- und Strangsanierung hoch drei. Sanierung in bewohntem Zustand. In: DW Die Wohnungswirtschaft (2014), Jg. 67, Nr. 8, S.18–19
- [24] Gumpp, Alexander; Hernandez-Maetschl, Sebastian: Operation am bewohnten Objekt. Niederlande. In: Mikado (2011), Nr. 12, S. 16 – 19
- [25] Kronberger, Andreas; Schöberl, Helmut; Schleger, Jakob: Sanierung Gründerzeitgebäude Eberlgasse auf Passivhausstandard. Selbstverlag; Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2015)
- [26] Rühl, Reinhold: Staub auf Baustellen. Stuttgart: Frauenhofer IRB Verlag (2019)
- [27] Rühl, Reinhard: Risiko Staub. Staubarmes Arbeiten schützt die Gesundheit – BG BAU unterstützt Unternehmen beim Einsatz von technischen Maßnahmen zur Staubminderung. In: IKZ Haustechnik (2017), Magazin für Gebäude- und Energietechnik (2017), Jg. 70, S. 52–55

- [28] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Bundes-Immissionsschutzgesetz.
URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/BImSchG.html> [Abruf: 11.09.2023]
- [29] Rühl, Reinhard: Durchatmen. Kontrollierter Umgang mit Staub auf der Baustelle. In: Bauhandwerk (2009), Jg. 31, Nr. 10, S. 48–51
- [30] Rühl, Reinhard: Von Falldauer und Luftwechsel. Staubminderung auf Baustellen. In: Der Maler und Lackierermeister (2014), Jg. 12, S. 28–31
- [31] Haltenorth, Ivo; et al.: Maßnahmen zur Minderung von Baulärm auf dem Ausbreitungsweg. In: IBP-Mitteilung (2006), IBP Report, Jg. 33, Nr. 463
- [32] Hettler, Steffen (2011): Baulärm ist rechtlich privilegiert! ...denn es gilt allein die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) Baulärm. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, Jg. 110, Nr. 12, S. 14–17
- [33] Umweltbundesamt [Hrsg] (2016): Baulärm.
URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachbarschaftslaerm-laerm-von-anlagen/baulaerm#baularm-was-tun> [Abruf: 26.07.2023]
- [34] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (05.09.2017): Beurteilung der Gefährdung durch Lärm. TRLV Lärm Teil 1, vom August 2017 (GMBI 2017, S. 592 [Nr. 34/35]); Messung von Lärm. TRLV Lärm Teil 2, vom August 2017 (GMBI 2017, S. 609 [Nr. 34/35]); Lärmschutzmaßnahmen. TRLV Lärm Teil 3, vom August 2017 (GMBI 2017, S. 615 [Nr. 34/35])
- [35] Hellwig, Runa Tabea; Bischof, Wolfgang: Gültigkeit thermischer Behaglichkeitsmodelle. In: Bauphysik (2006), Jg. 28, Nr. 2, S. 131–136
- [36] Richter, Wolfgang et al.: Thermische Behaglichkeit im Niedrigenergiehaus. Tl.2. Sommerliche Verhältnisse. Planungsleitfaden für Architekten und Fachplaner. Berlin (2011)
- [37] Bollin, Elmar; Feldmann, Thomas: Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort im Gebäudebetrieb durch den Einsatz prädiktiver Betriebsverfahren (PräBV). Abschlussbericht. Stuttgart (2013)
- [38] Richter, Wolfgang; Hartmann, Thomas: Thermische Behaglichkeit im Niedrigenergiehaus. Tl.1. Winterliche Verhältnisse. Planungsleitfaden für Architekten und Fachplaner. Berlin (2007)
- [39] Schmid, T. et al.: Dezentrale MSR. Konzeptentwicklung zur dezentralen Mess-Steuer- und Regelungstechnik in Gebäuden im Kontext des Internet of Things (2019)
- [40] DIN EN ISO 7730 (2003-10)
- [41] Baunetz_Wissen_Gesund Bauen: PMV.
URL: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/p/pmv-2350493> [Abruf: 12.09.2023]
- [42] Recknagel: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 78. Auflage, Vulkan-Verlag GmbH (2017), S. 200, 1099
- [43] DIN EN 12831: 2017-09

- [44] DIN EN ISO 7730:2005
- [45] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Leitfaden. Thermische Behaglichkeit im Niedrigenergiehaus, S.4.
URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/2003-1_Thermische_Behaglichkeit_Teil_1_Winter.pdf [Abruf: 10.10.2023]
- [46] Bedford und Liese in J. Reeker/P. Kraneburg: Haustechnik – Heizung Raumlufttechnik, Düsseldorf (1994)
- [47] Dentel, Arno; Dietrich, Udo (o.A.): Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden.
URL: https://rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation_Thermische_Behaglichkeit.pdf [Abruf: 30.08.2023]
- [48] Recknagel: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 77. Auflage, Vulkan-Verlag GmbH (2016)
- [49] Fehlhaber, Thomas: Das wohltemperierte Bauteil. Flächenaktivierung. Zeitschriftenaufsatz. In: Bundesbaublatt (2013), Jg. 62, Nr. 10, S. 48 – 52
- [50] Strubelt, Olaf: Das "wohltemperierte" Haus. Wandheizungen – Schlüssel zu Wohngesundheit und Energieeinsparung. Zeitschriftenaufsatz. In: TAB Technik am Bau (2003), Jg. 34, Nr. 4, S. 41 – 44
- [51] Müntjes, Martin: Thermische Bauteilaktivierung – Möglichkeiten und Entwicklungstrends. In: Bauportal (2015), Jg. 127, Nr. 1, S. 16 – 20
- [52] Krus, Martin; Kilian, Ralf (Hg.) (2012): Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung. Feuchtetechnische und wärmetechnische Aspekte. BauSIM 2012 Tagungsband, S. 46 – 52
- [53] Glück, Bernd: Thermische Bauteilaktivierung (Bauteilheizung und Bauteilkühlung). Plauen 1999
- [54] Rosenkranz, A.: Fußbodenheizungsrohre: Arten und Verlegung (2020).
URL: <https://www.heizung.de> [Abruf: 14.03.2023]
- [55] Lernprogramm von Deutsches Kupferinstitut (2019): Die Fachgerechte Kupferrohr-Installation.
URL: https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/09/DKI_Broschuere_i158_2019_ES.pdf [Abruf: 16.10.2023]
- [56] Datenblatt: Alu-Verbundrohre der Firma: Selfio, Artikel-Nr.: 100316MT-600.
URL: <https://www.selfio.de/heizung/fussbodenheizung> [Abruf: 14.03.2023]
- [57] Datenblatt: PE-RT Rohre der Firma: Selfio, Artikel-Nr.: 100316RT-600.
URL: <https://www.selfio.de/heizung/fussbodenheizung> [Abruf: 14.03.2023]
- [58] PE-XC der Firma: Selfio, Artikel-Nr.: 100316XC-600, Datenblatt.
<https://www.selfio.de/heizung/fussbodenheizung> [Abruf: 14.03.2023]
- [59] Datenblatt: PE-XA der Firma: Selfio, Artikel-Nr.: 100316XA-600.
URL: <https://www.selfio.de/heizung/fussbodenheizung> [Abruf: 14.03.2023]

- [60] Klempkes, C.: Energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile. Dynamisch thermische Simulation, messtechnische Validation, vereinfachte Bewertungsansätze, Fraunhofer IRB Verlag (2009), S. 25
- [61] Katalog der Firma Rehau: Rohrsysteme für Versorgungsnetze. Für die Sanierung und Neuverlegung (2013)
URL: www.rehau.de [Abruf: 14.03.2023]
- [62] Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau: Hydraulik.
URL: https://www.schweizer-fn.de/hydraulik/hydraulik.php#rohr_durchmesser [Abruf: 30.08.2023]
- [63] SBZ Monteur von Gentner. URL: <https://www.sbz-monteur.de> [Abruf: 30.08.2023]
- [64] Datenblatt: Styropor. URL: <https://www.styropor.com/> [Abruf: 12.09.2023]
- [65] Datenblatt: Styrodur. URL: <https://www.styrodur.de/> [Abruf: 12.09.2023]
- [66] Datenblatt: PU-Hartschaum.
URL: <https://www.bosig.de/> [Abruf: 12.09.2023]
- [67] Datenblatt: AF/Armaflex. URL: <https://pohl-isolierungen.de/> [Abruf: 12.09.2023]
- [68] Sanitär-Heizung-Klima-Informationen: PUR und PIR Was ist der Unterschied, IVPU-Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V., Stuttgart (2007), S. 2.
URL: http://www.bosy-online.de/Daemmstoffe/PUR%20und%20PIR_Was%20ist%20der%20Unterschied.pdf [Abruf: 16.10.2023]
- [69] Mäurer, A.: Recycling von EPS-Abfall zu re-expandierbarem Polystyrol, Forschungsprojekt „EPS-Loop“, 2005.
URL: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/> [Abruf: 16.03.2023]
- [70] Geisler, H., Klie, B.: Elastomer-Recycling („Devulkanisation“), Deutsches Institut für Kautschuktechnologie.
URL: www.dikautschuk.de/ [Abruf: 16.03.2023]
- [71] Energetisch Sanieren & Modernisieren: Putzarten im Überblick (2022)
URL: <https://www.sanier.de/malerarbeiten/putz/putzarten> [Abruf: 20.03.2023]
- [72] Pfaff, H.: Die Bedeutung von Putzmaterialien als Bestandteil von Wand-/Deckenheizsystemen, Heck Wall Systems GmbH, S. 5
- [73] Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baumaterialien.
URL: https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php [Abruf: 22.06.2023]
- [74] Energieheld (Hg.) (2019): Die Infrarotheizung – Funktion. Kosten, Vorteile und Nachteile.

- URL: <http://www.energieheld.de/heizung/elektroheizung/infrartheizung>
[Abruf: 16.10.2023]
- [75] Preisner, Benjamin (2019): Wirkungsgrad von Infrartheizungen. Eignung von infraroter Strahlung für Heizungen.
URL: <http://www.infrartheizung.org/wirkungsgrad/> [Abruf: 16.10.2023]
- [76] Technosonic GmbH (Hg.) (2019): Der Ratgeber zur Infrartheizung.
URL: <https://www.infrartheizungen.info/> [Abruf: 16.10.2023]
- [77] Langholz, Ralph: Alternative Beheizungsmöglichkeit durch Infrarot-Deckenstrahlheizungen. Operationssaal im Krankenhaus. In: Moderne Gebäudetechnik (2016). Jg. 70, Nr. 9, S. 14-16
- [78] Loga, Tobias et al.: Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen. BBS-Online-Publikation, Bonn (2019).
URL: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2019/bbsr-online-04-2019.html> [Abruf: 16.10.2023]
- [79] Energieausweise nach aktueller GEG: Statistiken zum Bedarfsausweis Wohngebäude.
URL: <https://online-energieausweis.org/bedarfsausweis/statistiken-zum-bedarfsausweis/> [Abruf: 16.10.2023]
- [80] Cali, Davide et al.: Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen. Fraunhofer IRB Verlag (2016)
- [81] Variotherm: Unterschied Strahlungswärme Versus Konvektionswärme.
URL: <https://www.variotherm.com/de/wissen/strahlungswaerme-versus-konvektionswaerme.html> [Abruf: 17.10.2023]
- [82] Bürgerhoff, Ulrich: Vorlesungsunterlagen Projekt zum Portfoliomanagement, Facility Management Master, WS18/19
- [83] Ruhl, Fabian; Motzko, Christoph; Lutz, Peter: Baulogistikplanung, Schnelleinstieg für Bauherren, Architekten und Fachplaner (2018), S.6
- [84] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Die Baustelleneinrichtung sicher und wirtschaftlich planen (2020), S.21.
URL: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Praxis/A84.html> [Abruf: 17.10.2023]
- [85] Hofstadler, Christian: Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb, Springer (2007), S.40
- [86] BG Bau: Koordination – mehr Sicherheit am Bau.
URL: https://www.bgbau-medien.de/handlungshilfen_gb/daten/bau/bm/00.html [Abruf: : 10.06.2020]
- [87] Claus Muchna, Hans Brandenburg, Johannes Fottner, Jens Gutermuth: Grundlagen der Logistik, Begriffe, Strukturen und Prozesse. Springer (2018), S.120
- [88] KALO: VDI 2077 – Berücksichtigung der Rohrwärme in der Heizkostenabrechnung.

- URL: <https://www.kalo.de/leistungen/heizkostenabrechnung/vdi-2077-rohr-waerme.html> [Abruf: 17.10.2023]
- [89] Eschenfelder, Dieter: Im Grundsatz ungerecht. Die neue Heizkostenverordnung beseitigt das Problem der Subventionierung außenliegender Wohnungen mit Wärme nicht. In: Deutsches Ingenieurblatt 16 (4), 2019, S. 46–51
- [90] Bundesministerium des Justiz: Verordnung über Heizkostenabrechnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. Oktober 2009 (BGBl. I S. 3250).
URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/heizkostenv/BJNR002610981.html> [Abruf: 17.10.2023]
- [91] Hacke, Ulrike et al.: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Selbstverlag (2012)
- [92] Uebel, Konrad: Start des Forschungsprojektes „Eversol“ in Kooperation mit der TU Freiberg.
URL: <https://www.freiberg-institut.de/forschungsprojekt-eversol/> [Abruf: 26.03.2020]
- [93] Deutscher Wetterdienst: Testreferenzjahre (TRY).
URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html> [Abruf: 17.10.2023]
- [94] DIN EN 12831-1
- [95] DIN V 18599-1
- [96] Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau: Berechnungen für Wärmeleitung bei Rohleitungen und Wänden.
URL: <https://www.schweizer-fn.de/waerme/waermeleitung/waermeleitung.php> [Abruf: 17.10.2023]
- [97] R. Pfliegl, Energieausweis für Wohngebäude, Bayrische Ingenieurekammer-Bau, Weichenlinden, Deutschland, 2009, S. 1
- [98] R. Ahnert: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz, Band 1, S. 71-72, 90, 113-122
- [99] Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Wohngebäude nach Baujahr.
URL: <https://www.statistikportal.de/de/wohngebaeude-nach-baujahr> [Abruf: 17.10.2023]
- [100] DIN EN 1996-1-1:2013-02, EN 1996-1-1:2005+A1:2012
- [101] Bayerische Bauordnung (BayBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007 (GVBl. S. 588) BayRS 2132-1-B.
URL: <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBO> [Abruf: 17.10.2023]
- [102] Krus, Martin: Recherische Untersuchungen zur Wandtemperierung – Feuchte-technische und Wärmetechnische Aspekte.
URL: http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2012/BauSIM2012_111.pdf [Abruf: 17.10.2023]

VII Anhänge

Die zur Projektdokumentation zugehörigen Anhänge sind digital vorgestellt. Sie umfassen Abbildungen aus dem Bericht, Zwischenberichte, Versuchsprotokolle, Datenblätter, Normen und Richtlinien, Bachelor- und Masterarbeiten, Poster, Broschüren und Präsentationen so wie Befragungen, und sind unter entsprechenden Ordner geteilt.