

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundvorhaben

Energieeffiziente Wohnsiedlungen durch zukunftsfähige Konzepte für den denkmalgeschützten Bestand – Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen (EnQM)

Schlussbericht Version 1.1 – ausführliche Fassung

Im Rahmen des

6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung

„Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“

Förderkennzeichen

03ET1417 A-D

Verbundpartner

Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im
Bauwesen (Verbundkoordination)

Margarethe Krupp-Stiftung
für Wohnungsfürsorge

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

RWTH Aachen, Lehrstuhl für integrierte Analog-
schaltungen und Lehrstuhl für Gebäude- und
Raumklimatechnik

Projektlaufzeit

01.10.2016 – 30.09.2025

Berichtszeitraum

01.10.2016 – 30.09.2025

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen
und Autoren**

Inhalt

ABBILDUNGEN.....	III
TEIL I: FORMALE ANGABEN.....	1
TEIL II: PROJEKTDOKUMENTATION.....	3
II.1 Projektbeschreibung.....	3
II.1.1 Ausgangszustand.....	3
II.1.2 Projektorganisation und geplante Maßnahmen	4
II.2 Realisierte Maßnahmen und deren Zielsetzung	6
II.3 Kostenstrukturen der Maßnahmen	8
II.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse	9
II.5 Konzept für die messtechnische Begleitung	11
II.6 Überblick über die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse	14
II.6.1 Teilprojekt 1 – Ganzheitliche Sanierungskonzepte für Baudenkmale	14
II.6.2 Teilprojekt 2 – Entwicklung und Erprobung denkmalgerechter Technologien	90
II.6.3 Teilprojekt 3 – Intelligente Quartiersvernetzung und Energieflussoptimierung ...	157
II.6.4 Teilprojekt 4 – Umsetzung in der Siedlung Margarethenhöhe	198
TEIL III: ENERGIEBILANZIERUNG	220
TEIL IV: ERFAHRUNGEN MIT DEN ANGEWENDETEN PLANUNGSWERKZEUGEN.....	223
TEIL V: AKZEPTANZBEWERTUNG	225
TEIL VI: VERWERTBARE PROJEKT-ERFAHRUNGEN	227
TEIL VII: ZUSAMMENFASSUNG UND GESAMTBEWERTUNG	229
TEIL VIII: GESAMTBEWERTUNG DES PROJEKTES.....	230
TEIL IX: LITERATUR.....	CCXXXII

Abbildungen

Abbildung 1: Zusammensetzung der Sanierungskomponenten	7
Abbildung 2: Konzeptionelle Bausteine	12
Abbildung 3: Jährlicher Energiebedarf pro Jahr – Mehrfamilienhäuser	16
Abbildung 4: Bauphasen nach Metzendorf []	17
Abbildung 5: Energiemonitoring im Gebäude.....	19
Abbildung 6: Klimamonitoring mit SmartHome-System (exemplarische Dokumentation)	19
Abbildung 7: Klimamonitoring mit Intensiv-System (exemplarische Dokumentation)	20
Abbildung 8: Schematischer Aufbau der Datenbank zur Speicherung der Smart Meter Daten	20
Abbildung 9: Leistungskurven der Stromzähler eines Zweifamilienhauses für Juli 2019	21
Abbildung 10: ermittelter Verbrauch der Smart Meter für ein Gebäude im Zeitraum des Jahres 2020	21
Abbildung 11: Stromverbrauch der Gebäude, bei denen für die kompletten Jahre 2020 und/oder 2021 Verbrauchsdaten erhoben werden konnten	22
Abbildung 12: Gasverbrauch der Gebäude, bei denen für die kompletten Jahre 2020 und/oder 2021 Verbrauchsdaten erhoben werden konnten.	22
Abbildung 13: Vor- und Rücklauftemperaturen Heizkörper Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18 ..	23
Abbildung 14: Raumtemperaturen Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg	23
Abbildung 15: Relative Raumluftheuchte Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18.....	24
Abbildung 16: CO2-Gehalt Luft Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18	24
Abbildung 17: Fensterstatus Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18	25
Abbildung 18: EG Luftschicht 200 mm – OG Luftschicht 500 mm	26
Abbildung 19: Exemplarischer Aufbau Decke Obergeschoss/Dachgeschoss	26
Abbildung 20: Dachaufbau	27
Abbildung 21: Dachaufbau mit Unterspannbahn (links) – Fenster DG (rechts).....	27
Abbildung 22: Innenwand aus Ziegelmauerwerk mit einer Stärke von 120 mm (exemplarisch)	28
Abbildung 23: Trockenbauwand nach Sanierung durch Margarethe Krupp-Stiftung	28
Abbildung 24 - Hoher Weg 18, Katasterplan und Foto	31
Abbildung 25 - Laubenweg 22, Katasterplan und Foto	31
Abbildung 26 - Sonnenblick 6, Katasterplan und Foto	31
Abbildung 27 - Metzendorfstraße 38, Katasterplan und Foto (Gebäude C links)	32
Abbildung 28 - Stensstraße 17, Katasterplan und Foto (Gebäude rechts)	32
Abbildung 29: Beheiztes Gebäudevolumen	33
Abbildung 30: Anteilige Wärmeverluste über die Gebäudehülle	33
Abbildung 31: Beheiztes Gebäudevolumen nach Sanierung	34
Abbildung 32: Temperatur- und Feuchteprofil der einschaligen Bestandsaußenwand	36
Abbildung 33: Temperatur- und Feuchteprofil der einschaligen Außenwand mit Innendämmputz	36
Abbildung 34: Temperatur- und Feuchteprofil der zweischaligen Bestandsaußenwand	37
Abbildung 35: Temperatur- und Feuchteprofil der zweischaligen Außenwand mit Innendämmputz	37
Abbildung 36: Metzendorfstraße 38 ABC Originalzeichnung von 1912	40
Abbildung 37: Grundriss des Erdgeschosses Sonnenblick 6 und 8	40
Abbildung 38: Grundrissgeometrie der Zone „Wohnzimmer“, Metzendorfstraße 38 C „Referenz Bestand 1995“	40
Abbildung 39: Dachgeschoss, Metzendorfstraße 38 ABC „Referenz Bestand 1995“	41

Abbildung 40: Darstellung der Treppenhau zones	41
Abbildung 41: Ansicht und Horizontalschnitt Referenzvariante Metzendorfstraße 38 ABC	41
Abbildung 42: Grundrisse der Metzendorfstraße 38 C in den Varianten „Ist-Zustand“ und „Sanierung“	42
Abbildung 43: Bauteildefinition von A1 in IDA ICE	42
Abbildung 44: Dachgauben der Metzendorfstraße 38 ABC im Editor	42
Abbildung 45: Gauben in der 3D-Ansicht, Sonnenblick 6 und 8	43
Abbildung 46: Weltkarte in Meteonorm mit den eingezeichneten Wetterstationen	43
Abbildung 47: Auszug des Codes des Klimaprozessors	43
Abbildung 48: Verlauf der Himmelstemperatur und der Außentemperatur ohne Bedeckungsgrad	44
Abbildung 49: Verlauf der Himmelstemperatur und der Außentemperatur mit Bedeckungsgrad	44
Abbildung 50: Einteilung des DWD mit Markierung der Margarethenhöhe	45
Abbildung 51: Unterschied Direktnormalstrahlung und horizontale Direktstrahlung	45
Abbildung 52: Koordinaten der Meteonorm und DWD Dateien	45
Abbildung 53: Außentemperaturverlauf der beiden Klimadien ste für das Testreferenzjahr der Margarethenhöhe	46
Abbildung 54: Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur	46
Abbildung 55: Jahresverlauf der diffusen Horizontalstrahlung bei Meteonorm und DWD	46
Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung der diffusen Horizontalstrahlung	47
Abbildung 57: Tagesprofile des Warmwasserbedarfs nach VDI 6002 Blatt 1	47
Abbildung 58: Wasserbedarf-Ganglinie Q_h einer Versorgungszone in Stuttgart mit ca. 7.200 Einwohnern	48
Abbildung 59: Wasserbedarf-Ganglinie Q_h einer Versorgungszone in Stuttgart mit ca. 4.000 Einwohnern	48
Abbildung 60: Tagesverteilung der Anwesenheit der Personen nach SIA 2014	48
Abbildung 61: Gerätenutzungsverteilung über einen Tag nach SIA 2014	49
Abbildung 62: Mögliche Beleuchtungszeiten	49
Abbildung 63: Zeitplan der Fensterlüftung in IDA ICE	49
Abbildung 64: Regelung „Fensterlüftung“, CO ₂ -Regelung	50
Abbildung 65: Regelung „Fensterlüftung“, Kühlungsbedarf	50
Abbildung 66: Regelung „Fensterlüftung“, Möglichkeit einer Kühlung	50
Abbildung 67: Regelung „Fensterlüftung“, Weiterleitung der Outputsignale	50
Abbildung 68: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Metzendorfstraße 38 C mit gekennzeichneten Gebäudevolumen	52
Abbildung 69: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Sonnenblick 8 mit gekennzeichneten Gebäudevolumen	52
Abbildung 70: Schnitt durch Metzendorfstraße 38 C mit gekennzeichneten Gebäudevolumen	52
Abbildung 71: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Metzendorfstraße 38 C mit gekennzeichneten Gebäudevolumen	52
Abbildung 72: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Sonnenblick 8 mit gekennzeichneten Gebäudevolumen	53
Abbildung 73: Darstellung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehüllen	53
Abbildung 74: Zusammenhang zwischen Innenlufttemperatur, Raumluftfeuchte und mindestens erforderlicher Innenoberflächentemperatur für eine oberflächennahe Luftfeuchte von 80 %	55
Abbildung 75: Innenoberflächentemperaturen [°C], Metzendorfstraße 38 ABC	55

Abbildung 76: Innenoberflächentemperaturen [°C], Sonnenblick 6 und 8	56
Abbildung 77: Innenoberflächentemperaturen bei 13 °C, Metzendorfstraße 38 ABC	56
Abbildung 78: Innenoberflächentemperaturen bei 13 °C, Sonnenblick 6 und 8	56
Abbildung 79: Sanierungsvariante mit beheiztem Dachgeschoss, Sonnenblick 6 und 8	57
Abbildung 80: Anzahl Übertemperaturgradstunden [Kh/a] der Varianten des Gebäudes Sonnenblick 6 + 8	58
Abbildung 81: Anzahl Übertemperaturgradstunden [Kh/a] der Varianten des Gebäudes Metzendorfstraße 38 ABC	59
Abbildung 82: Übertemperaturgradstunden bei 1200 Kh/a Sonnenblick 6 und 8	60
Abbildung 83: Übertemperaturgradstunden bei 1200 Kh/a Metzendorfstraße 38 ABC	61
Abbildung 84: Verhältnis der Dicke der Wärmedämmputzschicht (0-15 cm) und der Dachdämmstoffdicke (0-25 cm) zur Heizlast	62
Abbildung 85: Verhältnis der Dicke der Wärmedämmputzschicht (0-15 cm) und der Dachdämmstoffdicke (5-25 cm) zur Heizlast	62
Abbildung 86: Einfluss der Dämmstoffdicke des Dachs auf die Heizlast	63
Abbildung 87: Einfluss der Dämmstoffschichtdicke der Wand auf die Heizlast	63
Abbildung 88: Beispielhafter Aufbau Flächenheizung CompactFloor	63
Abbildung 89: Gewählter Fußbodenaufbau CompactFloor	64
Abbildung 90: Noppenelement mit eingelegten Rohren	64
Abbildung 91: Fußbodenaufbau mit Kermi x-net C15 Dünnschichtsystem	64
Abbildung 92: Vorgehen zur Bestimmung der passenden Fußbodenheizung	64
Abbildung 93: Verschiedene Systeme von Fußbodenheizungen, DIN EN 1264-2	65
Abbildung 94: Schematische Darstellung Frischwasserstation und Frischwasserstation mit Durchlauferhitzer	67
Abbildung 95: Energiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitung Metzendorfstraße 38 ABC	68
Abbildung 96: Energiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitung Sonnenblick 6 und 8	68
Abbildung 97: Bemaßung der Gartenflächen	68
Abbildung 98: Nutzenergiebedarf mit vier (links) und fünf (rechts) Erdwärmesonden, Metzendorfstraße 38 ABC	69
Abbildung 99: Nutzenergiebedarf mit vier (links) und fünf (rechts) Erdwärmesonden, Sonnenblick 6 + 8	69
Abbildung 100: Tagesmittelwerte der Erdoberflächtemperatur in 60 m Tiefe im elften Simulationsjahr	69
Abbildung 101: Bereitgestellte Temperatur mit und ohne Regeneration in einem Simulationszeitraum von 50 Jahre	70
Abbildung 102: Vor- und Rücklauf der Erdwärmesonde, Erdoberflächtemperatur in 60 m Tiefe, bereitgestellte Temperatur der Hybriddachsteine, Temperaturverlauf über eine Woche im Juli nach 50 Jahren	70
Abbildung 103: Ungestörte und durch Erdwärmesonden und Regeneration beeinflusste Erdoberflächtemperatur nach 50 Simulationsjahren	71
Abbildung 104: Entwurf des Anlagenschemas für die Anbindung der Komponenten an einen Speicher	72
Abbildung 105: Regelungskonzept	72
Abbildung 106: Anlagenschema in IDA ICE	73
Abbildung 107: Übersicht der simulierten Varianten	73
Abbildung 108: Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Metzendorfstraße 38 ABC	73
Abbildung 109: spezifischer Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Metzendorfstraße 38 ABC	74
Abbildung 110: Spezifischer Endenergiebedarf zur Gebäudebeheizung und Trinkwasserbereitung	74
Abbildung 111: Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Sonnenblick 6 und 8	74

Abbildung 112: Spezifischer Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Sonnenblick 6 und 8	75
Abbildung 113: Spezifischer Endenergiebedarf zur Gebäudebeheizung und Trinkwasserbereitung	75
Abbildung 114: Innenraumtemperatur Dachgeschossstiegenhauszone Sonnenblick 6 mit Heizkörper ...	77
Abbildung 115: Innenraumtemperatur Dachgeschossstiegenhauszone Sonnenblick 6 mit Fußbodenheizung.....	77
Abbildung 116: Spezifischer Strombedarf der Wärmepumpe der verschiedenen Sanierungsvarianten de	78
Abbildung 117: Endenergiebedarfsverlauf über ein Jahr, Metzendorfstraße 38 ABC	79
Abbildung 118: Endenergiebedarfsverlauf über ein Jahr, Sonnenblick 6 und 8	79
Abbildung 119: Endenergiebedarfsverlauf über einen Tag im Januar, Metzendorfstraße 38 ABC	80
Abbildung 120: Endenergiebedarfsverlauf über einen Tag im Januar, Sonnenblick 6 und 8	80
Abbildung 121: Endenergiebedarfsverlauf des Durchlauferhitzers über einen Tag im Januar, Metzendorfstraße 38 ABC	81
Abbildung 122: Endenergiebedarfsverlauf des Durchlauferhitzers über einen Tag im Januar, Sonnenblick 6 und 8.....	81
Abbildung 123: Februar 2018, Erdreichtemperaturverlauf	82
Abbildung 124: August 2018, Erdreichtemperaturverlauf	82
Abbildung 125: Februar 2019, Erdreichtemperaturverlauf	83
Abbildung 126: August 2019, Erdreichtemperaturverlauf	83
Abbildung 127: Februar 2018, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt	84
Abbildung 128: September 2018, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt	84
Abbildung 129: November 2018, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt	84
Abbildung 130: Februar 2019, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt	85
Abbildung 131: Rücklauftemperatur der Erdwärmesonden mit Regeneration im ersten Simulationsjahr .	85
Abbildung 132: Erdreichtemperatur ungestört und bei Einfluss der Erdwärmesonden und Regeneration im ersten Simulationsjahr	85
Abbildung 133: Leistung der Dachflächen je Ausrichtung.....	86
Abbildung 134: Bilanzielle Übersicht über die jährliche elektrische Energieverteilung des Gebäudes Metzendorfstraße 38 ABC	86
Abbildung 135: Kombinationen der Sanierungsbausteine	88
Abbildung 136: Komponenten des Putzsystems des Hochleistungsdämmputzes	91
Abbildung 137: Frisch angemischter Hochleistungsdämmputz	92
Abbildung 138: Materialmodell – Grundputz HASIT 610	93
Abbildung 139: Materialmodell – Hochleistungsdämmputz HASIT Fixit 222	93
Abbildung 140: Materialmodell – Spezial Einbettmörtel HASIT Fixit 223	94
Abbildung 141: Materialmodell – Deckputz HAIST Renodesign 252	94
Abbildung 142: Schematischer Aufbau Wärmepumpenprüfstand	97
Abbildung 143: Kennfelder für Heizkreisvorlauftemperaturen von 35 °C und 45 °C	98
Abbildung 144: Kennfelder für Heizkreisvorlauftemperaturen von 35 °C und 45 °C bei Pe, min	99
Abbildung 145: Exemplarische Darstellung der dynamischen Untersuchungen	99
Abbildung 146: Modell der Wärmepumpe in Dymola	100
Abbildung 147: Vergleich Simulation und Messpunkte für eine Heizkreisvorlauftemperatur von 35 °C..	101
Abbildung 148: Vergleich Simulation und Messpunkte für eine Heizkreisvorlauftemperatur von 45 °C..	101
Abbildung 149: Gebäude, die mit Wärmepumpe und Flachkollektoren ausgestattet werden können	102

Abbildung 150: Das Potential auf der Margarethenhöhe, Gebäude mit Wärmepumpe und Erdsonden auszustatten	103
Abbildung 151: 3D-CAD-Modell mit farbiger Darstellung der räumlichen Verteilung der Dachsteindicke	105
Abbildung 152: S-förmiges Kupferrohr (Subvariante 1a)	105
Abbildung 153: Integration von Rohren in den Dachsteinen (Konzept 1a)	106
Abbildung 154: Subvariante 1b; Kupferrohre (oben links); Integration von Rohren (oben rechts); Dachstein (unten)	106
Abbildung 155: Subvariante 1c; gekrümmt gebogenes Kupferrohr (links), Integration des Kupferrohrs in den Dachsteinkorpus (rechts).....	106
Abbildung 156: Vergleich der vorgeschlagenen Subvarianten des Wärmetauscherkonzepts beim Einsatz von planar und gekrümmt geformten Kupferrohren – Geometrie des Kupferrohres, Einbettung des Wärmetauschers in den Dachsteinkorpus aus Feinkornbeton sowie Angabe der zugehörigen Dachsteingewichte	107
Abbildung 157: Twin-Channel-Lösung mit Steckverbindern und Gewinden (links); eingebetteter Tunnel im Dachstein(rechts)	108
Abbildung 158: Abmessung der Twin-Channel-Lösung zur thermischen Aktivierung des Dachsteins ...	108
Abbildung 159: Geometrie der in den Simulationen berücksichtigten Dachsteingeometrien mit unterschiedlich langen Twin-Channel-Komponenten.....	108
Abbildung 160: Diskretisiertes Dachsteinmodell mit den mechanischen und thermischen Randbedingungen	109
Abbildung 161: Ansicht und Querschnitt des diskretisierten Dachsteinmodells mit der integrierten Twin-Channel-Komponente.....	109
Abbildung 162: LD-Kurve (Last – Verschiebung Kurve) für verschiedene Fälle (Konzept 2)	109
Abbildung 163: Darstellung der gerissenen Ober- und Unterseite des Dachsteins nach Überschreiten der maximalen Dehnung.....	110
Abbildung 164: Thermische Randbedingungen der CFD-Simulation an der Ober- und Unterseite des Dachsteins und Eintrittstemperatur des wärmeaufnehmenden und -abführenden Fluids (Wasser-Glykol-Gemisch)	110
Abbildung 165: Temperaturerhöhung der Flüssigkeit pro Betondachstein (3D-Ansicht).....	110
Abbildung 166: Temperaturzunahme des Wärmetauscherfluid längs der hintereinander geschalteten Dachsteine.....	111
Abbildung 167: Im 3D-Druck hergestellte Twin-Channel-Wärmetauscher mit montierten, drehbaren Anschlüssen für die Leitungen	111
Abbildung 168: Unterseite der Schalung für den Betondachstein mit montiertem Twin-Channel-Wärmetauscher in der Mitte	111
Abbildung 169: Unterseite mit Wärmetauscher und Oberseite mit CIGS-Modul des Betondachsteins...	112
Abbildung 170: Betondachstein mit Twin-Channel-Wärmetauscher und CIGS-PV-Modul (links) neben einem im Quartier eingesetzten Standardziegel	112
Abbildung 171: GUI Efficiency Viewer	113
Abbildung 172: Photovoltaisch aktivierte Dachziegel auf dem Dach mit Anbindung an das Energiespeichersystem	114
Abbildung 173: Foto des Konverters-Prototyps.....	114
Abbildung 174: Effizienz des Konverter-Prototyps.....	115
Abbildung 175: Zwei Hybrid-Dachziegel in Serie mit Konverter und Anbindung an das Energiespeichersystem	115
Abbildung 176: Demonstrator (links) und Messstation (rechts)	116

Abbildung 177: Elektronische Lasten und Messprogramm	116
Abbildung 178: Täglich verfügbare Energie pro m ²	116
Abbildung 179: Histogramm der verfügbaren Energie pro m ² über der Leistung	117
Abbildung 180: Energie pro Tag der gewellten Ziegel sowie der vollflächigen Dachsteine	118
Abbildung 181: Energie-Verhältnis zwischen gewelltem und vollflächigem Ziegel	118
Abbildung 182: Vollflächiger Ziegel mit defektem elektrischem Kontakt	119
Abbildung 183: Leistungskurve mit defektem Ziegel	119
Abbildung 184: Begrenzung der Effizienz durch die Schalttransistoren	120
Abbildung 185: Flächenabschätzung Hochsetzsteller, MPPT	120
Abbildung 186: Anordnung und Verbindung von 100 PV-Dachsteinen mit Schaltwandlern	120
Abbildung 187: 80 V System: Serienschaltung von zwei Schaltwandlern	121
Abbildung 188: Prinzipschaltung Solardachsteine und DC-DC Konverter mit externen Bauteilen	121
Abbildung 189: Effizienz des Schaltwandlers inklusive Kabelverluste	121
Abbildung 190: Einschwingverhalten zweier in Serie verschalteter Boost Konverter	122
Abbildung 191: Photovoltaisch aktivierte Dachziegel auf dem Dach mit Anbindung an das Energiespeichersystem	123
Abbildung 192: Layout des PCB am Energiespeichersystem (links) und des Clients als Aufsteckmodul für den P-DC-Konverter (rechts)	124
Abbildung 193: Aufbau des Power Line Communication Moduls am Energiespeichersystem	125
Abbildung 194: Schematische Abbildung des Leistungs-zu-Strom-Konverters	126
Abbildung 195: Darstellung des Platinenentwurfs des Leistungs-Strom-Konverters	127
Abbildung 196: Foto des Leistungs-Strom-Konverters im geschlossenen und offenen Gehäuse	127
Abbildung 197: Bild des Leistungs-Strom-Konverters ohne Gehäuse	127
Abbildung 198: Effizienz und Verlustleistung des Leistungs-Strom-Konverters	128
Abbildung 199: Gemessene Effizienz der Konverter über der Leistung bei Raumtemperatur (25°C) & ohne Gehäuse	129
Abbildung 200: Bilder des Messaufbaus der Salz-Eisbadmessung bei -18°C	130
Abbildung 201: Effizienzkurven von Konverter 7K bei verschiedenen Temperaturen	131
Abbildung 202: Wärmeinhalt des mit Wasser beladenen Betonwärmespeicher abhängig der Beladungstemperatur	134
Abbildung 203: Wärmeinhalt des mit Wasser beladenen Betonwärmespeicher abhängig der Beladungstemperatur	134
Abbildung 204: Erdreichtemperaturen in einer Tiefe von 2,5 m und in einer Entfernung von 10 cm von der außenseitigen Behälteroberfläche	134
Abbildung 205: Abklingverhalten des Speichers im Sommer abhängig der realisierten Dämmmaßnahme	135
Abbildung 206: Einbau Demonstrator	135
Abbildung 207: Schnitt durch den PCM-Versuchsprüfkörper mit mittlerer Führung des Wärmeträgerfluids innerhalb des Kupferrohrs und Darstellung der Anordnung der 6 Temperaturfühler zur Kontrolle der Temperaturverteilung	136
Abbildung 208: Hydraulisches Schema des PCM-Prüfstands	136
Abbildung 209: Anordnung der Temperatursensoren (a) Bezeichnung und schematische Verteilung der Temperatursensoren (b, c) Installation der Temperatursensoren	137
Abbildung 210: Hauptkomponenten des PCM-MSR-Konzepts: a) Erfassung Temperaturen b) Erfassung Regelung Aktoren c) Relais-Einheit d) MSR-Leitrechner	137

Abbildung 211: PCM-Prüfstand a) LHSU b) Wassertanks zur Bevorratung von Wasser auf einem Temperaturniveau oberhalb und unterhalb der Phasenwechseltemperatur c) Dreiwegeventile und Druckbehälter d) Mischsystem	138
Abbildung 212: Experimentelle Ergebnisse am Paraffinwachs als Phasenwechselmaterial - Schmelz- und Erstarrungszyklus	139
Abbildung 213: Simulation results of Paraffin wax as PCM	139
Abbildung 214: Experimentelle Ergebnisse von Paraffinwachs als PCM - Einfluss des HTF-Massenstroms auf die Schmelzzeiten	139
Abbildung 215: Experimentelle Ergebnisse von PureTemp 28 als PCM	140
Abbildung 216: Darstellung des Betonwärmespeichers mit den säulenartigen Kunststoffbehältern zur Aufnahme des PCM und deren spiralförmige Anordnung	140
Abbildung 217: Räumlicher Zusammenhang der Senke, der Quelle und des Speichers. Dabei können sich alle Komponenten im selben Gebäude befinden oder über mehrere Gebäude hinweg vernetzt und auch mehrfach vorhanden sein	141
Abbildung 218: Abstand je Gebäude von dem zentralen Speicher, sodass $K = 1$ bei unterschiedlichen Volumenverhältnissen des zentralen zu den dezentralen Speichern.	142
Abbildung 219: Aufbau des Modelica Modells eines Phasenwechselspeichers mit einem wärmeführenden Rohr	143
Abbildung 220: Konzept - „homee Energiemanagement“	146
Abbildung 221: Montage des homee Energiemanagers auf der Hutschiene	146
Abbildung 222: Montierte 3-Phasenzange	147
Abbildung 223: „Homescreen“ der homee Energiemanager App	148
Abbildung 224: „Geräte hinzufügen Screen“ im homee Smart Home System	148
Abbildung 225: Echtzeitdaten der Visualisierung	149
Abbildung 226: Verlaufsgrafik.....	149
Abbildung 227: Verlaufsgrafik „Verbrauch“	150
Abbildung 228: homee Energiemanager	150
Abbildung 229: Screen Energiemanager	151
Abbildung 230: Farbindexes ausgewählter Leuchtmittel.....	153
Abbildung 231: Gamut Area Index ausgewählter Leuchtmittel	153
Abbildung 232: Flimmeranteil einzelner Leuchten	154
Abbildung 233: Leistungsaufnahme im Standby	155
Abbildung 234: Energieverbrauch aufgeteilt nach Vernetzung und Lichterzeugung	155
Abbildung 235: Gebäudestruktur des Quartiers Margarethenhöhe.	158
Abbildung 236: Oberste Modellebene des Quartiermodells der Margarethenhöhe.....	164
Abbildung 237: Jahresverlauf der bezogenen Leistung im Quartier für die Gaskessel, die Nachtspeicherheizungen und den sonstigen Haushaltsstrom für den Ist-Zustand.....	165
Abbildung 238: Jahresverlauf der bezogenen Leistung für das Heizen (oben) und den Strom aller anderen elektrischen Verbraucher (unten) im Quartier im Ist-Zustand aufgeteilt nach Wohnen und GHD.	165
Abbildung 239: Verteilung der sanierten, teilsanierten und unsanierten Gebäude für das Stützjahr 2030 (links) und 2050 (rechts); Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).	166
Abbildung 240: Jahresenergiebedarf des Quartiers für die betrachteten Jahre und aufgeteilt nach Energieträger und -nutzung. Links ist jeweils der Bedarf der Wohnbebauung und rechts des gesamten Quartiers abgebildet.	167

Abbildung 241: PV-Ausbauszenario für die Jahre 2030 und 2050; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).	168
Abbildung 242: Residuallast des Wohnquartiers im Ist-Zustand und in den Stützjahren 2030 und 2050 mit Solardachsteinen.	169
Abbildung 243: Vergleich Deckungsgrad und Selbstversorgungsgrad für die Szenarijahren 2030 und 2050.	170
Abbildung 244: Kapazität der installierten Speicher in den Gebäuden bis zum Szenarijahren 2050; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).	171
Abbildung 245: Anzahl der Batterien je nutzbarer Speicherkapazität im Szenarijahren 2050.	171
Abbildung 246: Vergleich des Selbstversorgungsgrades des Quartiers 2030 und 2050 mit Photovoltaikanlagen und mit Photovoltaikanlagen + Batterien.	172
Abbildung 247: Vergleich des durchschnittlichen Ladezustands der Gebäudebatterien und der Quartiersbatterie 2050.	173
Abbildung 248: Ladezustand der Batterien im Quartier für eine Winterwoche für die Stützjahren 2030 und 2050 und die Quartiersbatterie in 2050.	173
Abbildung 249: Jahresbilanz der positiven Residuallast.	174
Abbildung 250: Verteilung des normierten Strombedarfs der Wärmepumpen bei normierter Stromerzeugung der Solardachsteine.	176
Abbildung 251: Berechnete Wärmelinien dichte des Quartiers nach angenommener Sanierung der Gebäude; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).	177
Abbildung 252: Verlauf eines möglichen Nahwärmenetzes (dunkelrot) in der Margarethenhöhe. Das Hotel ist das große zweiteilige Gebäude in der Mitte der Detaildarstellung; Hintergrundkarten von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).	178
Abbildung 253: Erstes Untermodell zur Erprobung der Regelung; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).	180
Abbildung 254: Zeitreihe der elektrischen Last (P_L), der bereitgestellten Leistung der PV-Anlage (P_{PV}), der Residuallast (ΔP) und der Lade-/Entladeleistung des Batteriespeichers (P_{BC}) für ein exemplarisches Gebäude.	181
Abbildung 255: Darstellung einer Model-prädiktiven Regelung (MPC) für ein zeitdiskretes System.	182
Abbildung 256: Leistungskurven des Unterquartiers für den Fall ohne Regelung (grau) und mit MPC-Regelung (grün).	182
Abbildung 257: Jährliche Heizwärmebedarfe des gesamten Quartiers Margarethenhöhe.	184
Abbildung 258: Jährliche Endenergiebedarfe des gesamten Quartiers Margarethenhöhe in unterschiedlichen Szenarien.	184
Abbildung 259: Treibhausgasemissionen des gesamten Quartiers Margarethenhöhe in unterschiedlichen Szenarien.	185
Abbildung 260: Darstellung der Warmmietenneutralität.	186
Abbildung 261: Dachstein-Prototyp – Typ-2.	193
Abbildung 262: Messaufbau mit Typ-2 an der RWTH Aachen	193
Abbildung 263: Vergleichsmessung mit Leistungseinbruch durch Kontaktprobleme im Kabelbaum	194
Abbildung 264: Tagesmessung zwischen Typ-2 und Autarq-Produkt	195
Abbildung 265: Eigenverschattung Typ-2: Eingebaut im Messstand	195
Abbildung 266: Typ-2 Blasenbildung unter Laminat	196
Abbildung 267: Typ-2 Blasenbildung in Laminierung	196
Abbildung 268: Vorderansicht Sommerburgstraße 35	199
Abbildung 269: Lage des Objektes Sommerburgstraße 35 im Katasterplan	199

Abbildung 270: Bestandplan Sommerburgstraße 35	200
Abbildung 271: Vorplanung bzgl. Grundrissänderung (gelb = Abriss, rot = Neu)	201
Abbildung 272: Empfohlene Maßnahmen seitens der Projektpartner – Sommerburgstraße 35	202
Abbildung 273: AdvancedEPD für Aerogel-Dämmputz	202
Abbildung 274: Schichtaufbau des Dämmstoffsystems	203
Abbildung 275: Thermischer Abschluss EG zu KG in Trockenbauweise	203
Abbildung 276: Aufbau und Gesamthöhe Fußbodenheizung (ohne Bodenbelag) für EG gegen Erdreich und unbeheizten Raum	204
Abbildung 277: Antrittsstufe im Bestand	205
Abbildung 278: Aufbau und Gesamthöhe Fußbodenheizung (ohne Bodenbelag) für OG und DG	205
Abbildung 279: Boden in DG	205
Abbildung 280: Aufgang in OG	205
Abbildung 281: Antrittsstufe zum OG im Bestand	206
Abbildung 282: Aufgang zu Dachgeschoss	206
Abbildung 283: rechte Darstellung – Bemusterung originale und thermisch-elektrisch aktivierte Dachsteine linke Darstellung – seit der Bemusterung weiterentwickelter Dachstein ohne farblich angepasste Beschichtung	206
Abbildung 284: Eignung Dächer Sommerburgstraße 35 – 39 (Quelle: GWI Essen)	207
Abbildung 285: Schematische Darstellung der Anlagentechnik – Wärme	207
Abbildung 286: Schematische Darstellung der Anlagentechnik – Strom	207
Abbildung 287: Wärmepumpe ecoGeo	208
Abbildung 288: Solarstation	208
Abbildung 289: Frischwasserstation	208
Abbildung 290: Pufferspeicher	209
Abbildung 291: Elektrischer Speicher	209
Abbildung 292: oben – Dachfläche Richtung Straße unten – Giebelseite	213
Abbildung 293: Aufgedecktes Dach – Daheim 3 B	214
Abbildung 294: Originalziegel und SHDS – Richtung Straße	214
Abbildung 295: SHDS – Richtung Straße	215
Abbildung 296: vorbereiteter thermischer Anschluss SHDS	215
Abbildung 297: Vergleich zwischen den gemessenen Jahresverbräuchen des Jahres 2020 der Gebäude mit Smart Metern im Quartier mit Berechnungen basierend auf Standardannahmen	221

Tabellen

Tabelle 1: Ausschnitt Monitoringdatenpunkte	12
Tabelle 2: Zusammenstellung der Objekte.....	18
Tabelle 3: Luftwechselrat n_{50} (1/h)	29
Tabelle 4: Wasseraufnahmekoeffizient nach Karsten	29
Tabelle 5: Objekte im Intensivmonitoring	30
Tabelle 6: Vergleich Sanierungsvarianten.....	35
Tabelle 7: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse mit dem Programm Cond 2.2	38
Tabelle 8: Variation der Dämmstärken	39
Tabelle 9: Verbale Bezeichnung des Gesamtbedeckungsgrades nach DWD	51
Tabelle 10: Statistische Belegungszahl n_p von Wohnungen nach VDI 6002 Blatt 1, VDI 2067-12	51
Tabelle 11: Belegungsanzahl je Wohnung in den ausgewählten Gebäuden je Simulationsvariante.	51
Tabelle 12: Eingabewerte für die internen Wärmegewinne nach SIA 2024.....	51
Tabelle 13: Personenverteilung über die Fläche der personenbelegten Räume.	51
Tabelle 14: Übersicht der Sanierungsvarianten	54
Tabelle 15: Vergleich der gegebenen Bauteile aus dem Bauteilkatalog und deren Sanierungsvarianten mit den Normbauteilen nach Mindestwärmeschutz	54
Tabelle 16: Zugrunde gelegte Bezugswerte der operativen Innentemperatur für die Sommerklimaregionen und Übertemperaturgradstundenanforderungswerte	55
Tabelle 17: spezifische Auslegungsleistung $[W/m^2]$ mit IDA ICE, Sonnenblick 6 und 8.	65
Tabelle 18: spezifische Auslegungsleistung $[W/m^2]$ mit IDA ICE, Metzendorfstraße 38 ABC	65
Tabelle 19: Deckung der spez. Auslegungsleistung $[W/m^2]$ mit CompactFloor, Sonnenblick 6 und 8	66
Tabelle 20: Deckung der spez. Auslegungsleistung $[W/m^2]$ mit CompactFloor, Metzendorfstraße 38 ABC.	66
Tabelle 21: Deckung der spez. Auslegungsleistung $[W/m^2]$ mit Kermi, Sonnenblick 6 und 8	66
Tabelle 22: Deckung der spez. Auslegungsleistung $[W/m^2]$ mit Kermi, Metzendorfstraße 38 ABC	66
Tabelle 23: Ausgewählte Heizkörper Metzendorfstraße 38 ABC	67
Tabelle 24: Ausgewählte Heizkörper Sonnenblick 6 und 8.....	67
Tabelle 25: Erforderliche Wärmepumpleistungen der verschiedenen Varianten	71
Tabelle 26: Technische Daten der gewählten Wärmepumpen	71
Tabelle 27: Flächenbedarf der Entzugsmittel und vorhandene unversiegelte Fläche	71
Tabelle 28: Gewählte Anlagentechnik	72
Tabelle 29: Zusammenfassung Eingabedaten und Energiebedarf Metzendorfstraße 38 ABC	75
Tabelle 30: Zusammenfassung Eingabedaten und Energiebedarf Sonnenblick 6 und 8	76
Tabelle 31: Benötigte Heizleistung/ spezifische Heizleistung der Wärmeverbraucher zum Erreichen der Solltemperatur.	76
Tabelle 32: Auslegung der Varianten mit beheiztem Dachgeschoss.....	76
Tabelle 33: Zusammenfassung der Anlagentechnik der Umsetzungsempfehlungen.....	77
Tabelle 34: Überblick über die Dachflächen.....	86
Tabelle 35: Mischungsverhältnis und Mischbedingungen der Putzsystemkomponenten.....	91
Tabelle 36: Zusammenfassung verschiedener feuchte- und wärmetechnischer Kennwerte $\square$	92
Tabelle 37: Messergebnisse für verschiedene Sole/Wasser-Temperaturpaarungen	97
Tabelle 38: Messergebnisse bei minimaler Leistungsaufnahme (P_e , min).....	98
Tabelle 39: Vergleich von Kupferpreis und Herstellpreis für gebogenes Kupferrohr	107

Tabelle 40: Aufführung der durchgeführten Messungen bei Raumtemperatur (25°C) und ohne Gehäuse	129
Tabelle 41: Aufführung der durchgeführten Messungen an Konverter 7K bei verschiedenen Temperaturen	130
Tabelle 42: Materialdaten Speicherberechnungen	133
Tabelle 43: Ausgangsbedingungen	136
Tabelle 44: PCM-Spezifikationen (Herstellerangaben)	138
Tabelle 45: Beleuchtungskomponenten in Modellrechnung	154
Tabelle 46: spezifischer Heizwärmebedarf für die verwendeten Gebäudeklassen und Anzahl der Gebäude in den Klassen.	158
Tabelle 47: Strombedarf nach Personenanzahl je Haushalt nach [7].	159
Tabelle 48: GHD-Typologie.	161
Tabelle 49: Energiebedarf des Quartiers aufgeteilt in Wohngebäude und GHD-Einheiten.	161
Tabelle 50: Zuordnung der GHD-Cluster zu den Standardlastprofilen Strom und Wärme.	162
Tabelle 51: Strom- und Gasbezug des Wohnquartiers in den Szenarien.	175
Tabelle 52: Vergleich der Simulationszeit und der Netzbelastung für eine Jahressimulation des Untermodells mit elf Gebäuden.	183
Tabelle 53: Typ-2 Kurzschlussströme	194
Tabelle 54: Wärmedämmung des Systems – Mindest-Wärmeleitwiderstände der Dämmschichten unter den Leitungen des Fußbodenheiz-bzw. Kühlsystems (m ² K)/W	203
Tabelle 55: Aufbauhöhen im Bestand und mit Fußbodenheizung	204
Tabelle 56: PV-Eignung der Dächer – Sommerburgstraße 35 – 39 (Quelle: GWI Essen)	207
Tabelle 57: Maßnahmen an den einzelnen Objekten	210
Tabelle 58: Vergleich der zur Berechnung verwendeten und gemessenen Jahresverbräuche bezogen auf die beheizte Wohnfläche (BWF).	220

TEIL I: Formale Angaben

Projektname	Energieeffiziente Wohnsiedlungen durch zukunftsfähige Konzepte für den denkmalgeschützten Bestand – Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen (EnQM)
Förderkennzeichen	03ET1417 A-D
Zuwendungsempfänger und Projektleiter	Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (Verbundkoordination) [IWB], Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht Margarethe Krupp-Stiftung für Wohnungsfürsorge [MKS], Michael Flachmann Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. [GWI], Jörn Benthin RWTH Aachen, Lehrstuhl für integrierte Analogschaltungen [RWTH-IAS] und Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik [RWTH-EBC], Prof. Dr.-Ing. Stefan Heinen und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller
Projektlaufzeit	01.10.2016 – 30.09.2025

1. Projektzielsetzung	Im Verbundvorhaben „EnQM“ soll gezeigt werden, wie durch energetische Sanierung, innovative Gebäudetechnik und intelligente elektrische, thermische und digitale Vernetzung denkmalgeschützte Quartiere energetisch optimiert werden. In der historischen Gartenstadt Margarethenhöhe in Essen soll dieser Ansatz analysiert und mit den im Projekt entwickelten und angepassten Technologien beispielhaft umgesetzt werden. Dabei werden die Potentiale der Maßnahmen sowohl für einzelne Gebäude als auch für die ganze Siedlung untersucht.
2. Arbeitsplan (Kurzfassung)	TP 1 – Ganzheitliche Sanierungskonzepte für Baudenkmale AP 1.1: Bestandsdatenanalyse Gebäude AP 1.2: Monitoring und Untersuchungen Bestand AP 1.3: Energiebedarfsberechnungen Bestand AP 1.4: Simulation Gebäudehülle AP 1.5: Thermische Gebäudesimulation AP 1.6: Sanierungskonzepte Gebäude TP 2 – Entwicklung u. Erprobung denkmalgerechter Technologien AP 2.1: Energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle mit Dämmputz AP 2.2: Wärmeübergabe bei niedrigen Heiztemperaturmedien AP 2.3: Wärmeerzeugung mittels Mikrowärmepumpe AP 2.4: Elektrische u. thermische Energie durch aktivierte Dachsteine AP 2.5: Gebäudebezogene u. quartiersintegrierte Speicherung von Strom AP 2.6: Gebäudebezogene/quartiersintegrierte Speicherung von Wärme AP 2.7: Kommunikationsnetze zur digitalen Quartiersvernetzung AP 2.8: Anpassung Smart-Home-Komponenten auf denkmalgeschützten Bestand AP 2.9: Energieeffiziente LED-Technologie TP 3 – Intelligente Quartiersvernetzung und Energieflussoptimierung AP 3.1: Bestandsanalyse Energieversorgung Quartier AP 3.2: Potenzialanalyse KWK-Systeme AP 3.3: Externe Energiezufuhr AP 3.4: Modellbildung AP 3.5: Regelungskonzept AP 3.6: Geschäftsmodelle AP 3.7: Zusammenfassung, Empfehlungen u. Übertragbarkeit TP 4 – Umsetzung im Quartier

	AP 4.1: Planung, Ausschreibung u. Überwachung der Sanierungsmaßnahmen AP 4.2: Ausführung der Maßnahmen AP 4.3: Begleitung der Planung und Umsetzung AP 4.4: Monitoring zur Einregulierung
Datum	Stuttgart, Essen, Aachen den 31.03 2026
Berichtersteller:	Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen Margarethe Krupp-Stiftung für Wohnungsfürsorge Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. RWTH Aachen, Lehrstuhl für integrierte Anlagenschaltungen und Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

TEIL II: Projektdokumentation

II.1 Projektbeschreibung

II.1.1 Ausgangszustand

Die historische Gartenstadt Margarethenhöhe in Essen stellt einen in Deutschland einzigartigen, großmaßstäblichen denkmalgeschützten Wohnungsbestand dar, der zugleich ein erhebliches Transformationspotenzial im Kontext der Energiewende aufweist. Die Siedlung wurde von der Stiftung Margarethe Krupp initiiert, um der im Zuge der Industrialisierung entstandenen Wohnungsnot zu begegnen. Ziel war die Schaffung qualitätsvollen Wohnraums für Bevölkerungsschichten mit gesichertem Einkommen, die jedoch nicht über die Möglichkeit zum Eigentumserwerb verfügten. Gleichzeitig war ausdrücklich nicht die Ausbildung einer reinen Werksiedlung beabsichtigt; vielmehr wurde eine soziale Durchmischung unterschiedlicher Berufs- und Altersgruppen angestrebt.

Mit der Planung und Realisierung wurde Georg Metzendorf beauftragt, der die Margarethenhöhe in den Jahren 1909 bis 1933 als eine der frühen Siedlungen nach dem Gartenstadtprinzip errichtete; eine Erweiterung in vergleichbarer städtebaulicher Struktur erfolgte in den Jahren 1934 bis 1938. Der Gebäudebestand wurde im Zweiten Weltkrieg zu rund 40 % zerstört, jedoch in Struktur und gestalterischer Qualität weitgehend entsprechend wiederaufgebaut. Seit 1987 stehen die von Metzendorf errichteten Bereiche formell unter Denkmalschutz; angrenzende Bestandsbauten werden als denkmalnah eingeordnet.

Der denkmalgeschützte Kernbereich der Margarethenhöhe, auf den sich das Verbundvorhaben „EnQM – Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen“ fokussiert, umfasst 586 Häuser. Es handelt sich überwiegend um 1,5- bis 3,5-geschossige Reihen- und Doppelhäuser sowie kleinere Mehrfamilienhäuser. Die Mietwohnungen weisen typischerweise zwei bis fünf Zimmer auf und erstrecken sich teilweise über bis zu drei Geschosse. Im denkmalgeschützten Bereich leben etwa 2.500 Personen. Neben der Wohnnutzung sind im Quartier auch Einrichtungen des täglichen Bedarfs vorhanden, darunter Einzelhandel, Gastronomie, Kinderbetreuung, Grundschule, Sportflächen, Gesundheitswesen und Kirchen. Die Siedlung befindet sich nahezu vollständig im Besitz der Margarethe Krupp-Stiftung für Wohnungsfürsorge und wird ausschließlich vermietet.

Aus städtebaulicher Sicht ist die Siedlung als stark durchgrünte Gartenstadt mit geringer baulicher Dichte geprägt; das Verhältnis von Grundfläche zu Grundstücksfläche liegt im Mittel bei etwa 0,2. Trotz der topografisch angepassten Straßenführung wurde bei der Bebauung darauf geachtet, Wohneinheiten nicht ausschließlich nach Norden zu orientieren. Die Bewohnerstrukturen und Nutzungsmuster sind heterogen. Ein wesentlicher Teil der Bewohnerschaft ist einem häuslich orientierten Wohnkonzept zuzuordnen, bei dem Nachbarschaft, Sicherheit, Nutzungsorientierung und Nachhaltigkeit eine hohe Bedeutung besitzen.

Der energetische Ausgangszustand des Quartiers ist in weiten Teilen durch die Bauzeit geprägt. In zahlreichen Gebäuden finden sich ungedämmtes, verputztes Ziegelmauerwerk, teilweise Einfachverglasungen sowie ungedämmte Dachkonstruktionen. Im Rahmen der kontinuierlichen Instandhaltung wurden in der Vergangenheit vorrangig Fenster ausgetauscht, um Komfort- und Effizienzaspekte zu verbessern. Gleichwohl ist der Bestand insgesamt weiterhin durch eine energetisch ungünstige Ausgangslage mit vergleichsweise hohen Wärmeverlusten gekennzeichnet.

Auch die Wärmeversorgung ist durch einen historisch gewachsenen, heterogenen Anlagenbestand geprägt. Ursprünglich basierte die Versorgung auf einer standardisierten kombinierten Heiz-, Koch-, Bade- und Ventilationsanlage, bei der Abwärme aus Kochen und Warmwasserbereitung über Luftkanäle und Brenneinsätze zur Raumbeheizung genutzt wurde. Dieses System

ist heute in nahezu allen Gebäuden stillgelegt beziehungsweise zurückgebaut. Stattdessen besteht im Quartier mittlerweile eine Vielfalt unterschiedlicher Heizsysteme, die von Gaszentral- und Gasetagenheizungen bis hin zu Stromheizungen reicht. Diese Heterogenität bildet eine wesentliche Randbedingung für die Entwicklung eines quartiersbezogenen und skalierbaren Transformationspfades.

Eine zentrale Rahmenbedingung des Vorhabens ergibt sich darüber hinaus aus den denkmalpflegerischen Anforderungen. Für die Siedlung existiert ein mit der Denkmalpflege abgestimmter Katalog, der regelmäßig erforderliche Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen mit reduziertem Genehmigungsaufwand ermöglicht. Dieser Katalog fokussiert vor allem gestalterische Kriterien zum Erhalt der Denkmalwürdigkeit. Energetisch relevante Handlungsspielräume betreffen im Wesentlichen den Umgang mit originalen Fenstern, insbesondere die Möglichkeit eines innenliegenden zusätzlichen Fensters, sowie die Option einer Zwischensparrendämmung der Dächer auch unabhängig von einem Dachausbau. Der Lösungsraum für energetische Maßnahmen und insbesondere für serielle beziehungsweise standardisierte Umsetzungen ist damit deutlich eingeschränkt. Gerade daraus ergibt sich jedoch die besondere Eignung des Quartiers als Reallabor für denkmalverträgliche LowEx- und Vernetzungskonzepte.

Vor diesem Hintergrund wurde das Verbundvorhaben EnQM konzipiert. Ziel war es, aufzuzeigen, wie durch die Kombination aus energetischer Sanierung, innovativer Gebäudetechnik sowie intelligenter elektrischer, thermischer und digitaler Vernetzung denkmalgeschützte Quartiere energetisch optimiert werden können. Die Ausgangslage aus historisch wertvollem Gebäudebestand, heterogener technischer Ausstattung, begrenzten Eingriffsmöglichkeiten und zugleich hohem Transformationsdruck begründet damit unmittelbar die Kernmotivation sowie den wissenschaftlich-technischen Handlungsbedarf des Vorhabens

II.1.2 Projektorganisation und geplante Maßnahmen

Das Verbundvorhaben „EnQM – Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen“ war als interdisziplinäres und arbeitsteiliges Forschungs- und Demonstrationsprojekt angelegt. Die Verbundstruktur umfasste vier thematisch voneinander abgegrenzte, zugleich jedoch eng miteinander verzahnte Teilprojekte, die von den jeweiligen Projektpartnern bearbeitet wurden. Die Gesamtkoordination lag beim Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart. Die Organisationsstruktur war darauf ausgerichtet, gebäudebezogene und quartiersbezogene Fragestellungen nicht isoliert, sondern im Zusammenhang zu bearbeiten. Hierfür wurden Kompetenzen aus den Bereichen Bauphysik, Gebäudetechnik, Leistungselektronik, Quartiersmodellierung, Wohnungswirtschaft und Denkmalpflege systematisch zusammengeführt.

Inhaltlich gliederte sich das Vorhaben in die vier Teilprojekte TP 1 – Ganzheitliche Sanierungskonzepte für Baudenkmale, TP 2 – Entwicklung und Erprobung denkmalgerechter Technologien, TP 3 – Intelligente Quartiersvernetzung und Energieflussoptimierung sowie TP 4 – Umsetzung in der Siedlung Margarethenhöhe. Die Projektbearbeitung erfolgte in zwei übergeordneten Phasen. In einer ersten Untersuchungs- und Entwicklungsphase wurden der energetische und bauphysikalische Ist-Zustand erfasst, Konzepte und Technologien entwickelt sowie ihre Wirkungen rechnerisch, simulativ und im Labor untersucht. Daran schloss sich eine Umsetzungs- und Validierungsphase an, in der ausgewählte Maßnahmen exemplarisch im Quartier realisiert, messtechnisch begleitet und anhand realer Betriebsdaten bewertet wurden. Der Übergang zwischen beiden Phasen wurde durch einen projektinternen Meilenstein markiert, an dem in Abstimmung mit Projektträger, Denkmalpflege und Eigentümerseite der Umfang der Demonstrationsmaßnahmen festgelegt wurde.

Im Teilprojekt 1 stand die wissenschaftlich fundierte Entwicklung denkmalverträglicher Sanierungskonzepte im Vordergrund. Hierzu sollten zunächst die baulichen, anlagentechnischen und

energetischen Ausgangsbedingungen der Bestandsgebäude detailliert erfasst werden. Ergänzend war der Einbau und Betrieb von Monitoringtechnik vorgesehen, um Raumklima-, Nutzungs- und Energiedaten als belastbare Grundlage für die weiteren Untersuchungen zu gewinnen. Darauf aufbauend sollten thermisch-hygrische Simulationen zur Bewertung möglicher Hüllertüchtigungen sowie dynamische thermische Gebäudesimulationen zur Analyse von Lastgängen, Betriebsweisen und Versorgungskonzepten durchgeführt werden. Ziel war es, integrative Sanierungskonzepte zu entwickeln, die sowohl den energetischen Anforderungen als auch den denkmalrechtlichen Rahmenbedingungen gerecht werden. Die Ergebnisse dieses Teilprojekts bildeten zugleich die fachliche Grundlage für die technologische Weiterentwicklung in TP 2 sowie für die quartiersbezogene Modellbildung in TP 3.

Das Teilprojekt 2 war auf die Entwicklung, Anpassung und Validierung innovativer, denkmalgerechter LowEx-Technologien ausgerichtet. Vorgesehen war insbesondere die energetische Erhöhung der Gebäudehülle mittels Hochleistungsdämmputz, die Entwicklung geeigneter Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme sowie der Einsatz und die Optimierung von Mikrowärmepumpen. Hinzu kamen Arbeiten zu thermisch-elektrisch aktivierten Dachsteinen mit photovoltaischer Nutzung, zu gebäude- und quartiersintegrierten Strom- und Wärmespeichern sowie zur Entwicklung und Anpassung digitaler Kommunikations- und Smart-Home-Systeme. Ergänzend sollten energieeffiziente LED-Beleuchtungskonzepte untersucht werden. Die in diesem Teilprojekt entwickelten Technologien waren sowohl für Labor- und Prüfstandsuntersuchungen als auch für den späteren Einsatz in Demonstrationsgebäuden vorgesehen.

Im Teilprojekt 3 sollte die systemische Integration der Einzelkomponenten in ein quartiersbezogenes Energiesystem erfolgen. Aufbauend auf den Ergebnissen der gebäude- und technologiebezogenen Untersuchungen war geplant, die bestehende Energieversorgung des Quartiers zu analysieren, Potenziale verschiedener Versorgungsoptionen zu bewerten und daraus ein ganzheitliches Quartiersmodell zu entwickeln. Dazu gehörten die Modellbildung für elektrische und thermische Verbraucher, Speicher und Erzeuger, die Entwicklung geeigneter Regelungsansätze sowie die Betrachtung von Geschäftsmodellen, Förderbedingungen und Übertragungsmöglichkeiten. Ziel dieses Teilprojekts war es, aus den Einzelmaßnahmen keinen bloßen Maßnahmenkatalog, sondern einen belastbaren Transformationspfad für das Gesamtquartier abzuleiten.

Das Teilprojekt 4 diente schließlich der exemplarischen Umsetzung und Validierung der im Projekt entwickelten Konzepte. Geplant waren die Planung, Ausschreibung und bauliche Realisierung ausgewählter Sanierungsmaßnahmen, die Integration innovativer Anlagentechnik, die Installation von Monitoring- und Messsystemen sowie eine wissenschaftlich begleitete Einregulierungsphase. Ein wesentliches Ziel bestand darin, die in den vorangegangenen Teilprojekten entwickelten Simulations- und Modellannahmen anhand realer Betriebsdaten zu überprüfen. Damit übernahm TP 4 die zentrale Funktion, den Übergang von der konzeptionellen und experimentellen Entwicklung zur praktischen Demonstration unter den realen Randbedingungen eines denkmalgeschützten Quartiers sicherzustellen.

Insgesamt war die Projektorganisation darauf ausgelegt, die gesamte Innovationskette von der Bestandsanalyse über die Entwicklung und Bewertung einzelner Technologien bis hin zur praktischen Umsetzung und Validierung im Quartier abzudecken. Dadurch wurde eine belastbare Struktur geschaffen, die nicht nur wissenschaftliche Erkenntnisse zum energieoptimierten Umgang mit denkmalgeschütztem Wohnungsbestand ermöglichte, sondern zugleich auf eine praxisnahe Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Quartiere ausgerichtet war.

II.2 Realisierte Maßnahmen und deren Zielsetzung

Die im Verbundvorhaben „EnQM“ realisierten Maßnahmen beruhten auf den in den Arbeitspaketen entwickelten Sanierungs-, Technologie- und Systemkonzepten. Ziel war es nicht, eine flächendeckende Vollsanierung des Quartiers vorzunehmen, sondern ausgewählte Komponenten exemplarisch unter den Randbedingungen eines denkmalgeschützten Bestands umzusetzen, ihre technische Machbarkeit nachzuweisen und ihre energetische Wirkung messtechnisch zu validieren. Die Umsetzung erfolgte unter konsequenter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Anforderungen sowie in enger Abstimmung mit Eigentümer- und Nutzerseite.

Im Bereich der Gebäudehülle wurden Maßnahmen umgesetzt, die auf eine Verbesserung des Wärmeschutzes bei gleichzeitigem Erhalt der denkmalgeschützten Bausubstanz und Fassadengestaltung abzielten. Hierzu gehörte insbesondere die innenseitige energetische Ertüchtigung ausgewählter Demonstrationsobjekte mit einem Hochleistungsdämmputzsystem. Diese Maßnahme sollte die Transmissionswärmeverluste reduzieren, die Voraussetzungen für abgesenkte Heizsystemtemperaturen im Sinne eines LowEx-Betriebs schaffen und zugleich bauphysikalische Risiken wie Tauwasserbildung, Schimmelbildung oder hygrische Fehlstellen vermeiden. Die Umsetzung wurde durch thermisch-hygrische Simulationen vorbereitet und messtechnisch begleitet. Ergänzend wurden im Rahmen der zulässigen denkmalrechtlichen Spielräume Dachkonstruktionen energetisch verbessert, insbesondere durch Zwischensparrendämmungen. Damit sollten die Wärmeverluste über die Dachflächen reduziert, der sommerliche Wärmeschutz verbessert und zugleich die Voraussetzungen für die Einbindung aktiver Dachkomponenten geschaffen werden.

Im Bereich der Anlagentechnik konzentrierten sich die realisierten Maßnahmen auf die Einführung lowex-tauglicher Wärmeversorgungslösungen. In Demonstratorgebäuden wurden angepasste Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme, d. h. Flächenheizsysteme, integriert. Ziel dieser Maßnahmen war es, die erforderlichen Vorlauftemperaturen abzusenken, die Effizienz von Wärmepumpensystemen zu steigern, den thermischen Komfort zu verbessern und die Kompatibilität der Gesamtsysteme mit Niedrigenergiekonzepten zu erhöhen. Ergänzend wurde der Einsatz angepasster Wärmepumpentechnologien exemplarisch umgesetzt. Damit war das Ziel verbunden, fossile Wärmeerzeuger zu substituieren, CO₂-Emissionen zu reduzieren, die Betriebsstabilität solcher Systeme im historischen Gebäudebestand zu untersuchen und ihre Effizienz unter realen Lastprofilen zu bewerten.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung und demonstratorischen Anwendung thermisch-elektrisch aktivierter Dachsteine. Im Projekt wurden photovoltaisch aktivierte Dachsteine mit integrierter Leistungselektronik entwickelt und in die Systembetrachtung einbezogen. Ziel war dabei eine denkmalverträgliche Form der regenerativen Stromerzeugung, die sich in historische Dachlandschaften integrieren lässt. Zugleich sollte die Kopplung elektrischer und thermischer Nutzungspotenziale untersucht, die Eigenverbrauchsquote erhöht und ein modulares, auf den denkmalgeschützten Bestand übertragbares Systemkonzept entwickelt werden.

Die Maßnahmen zur Speicherung und Vernetzung dienten dazu, die Einzelkomponenten nicht isoliert, sondern als Teil eines integrierten Energiesystems zu betrachten. Gebäudebezogene elektrische Speicher wurden in das Energiemanagement eingebunden, um Lastverschiebungen zu ermöglichen, den Eigenverbrauch lokal erzeugter elektrischer Energie zu erhöhen und Netzbezugsspitzen zu reduzieren. Daneben wurden unterschiedliche thermische Speicheransätze untersucht. Diese sollten überschüssige regenerative Energie zwischenspeichern, das Wärmesystem stabilisieren und niedrige Systemtemperaturen unterstützen. Damit wurde bereits im Demonstrationsmaßstab der Übergang von der Einzelmaßnahme zum systemisch vernetzten Betrieb vorbereitet.

Auch die digitale Vernetzung und das Energiemanagement waren wesentliche Bestandteile der Maßnahmen. Implementiert wurden digitale Komponenten zur Erfassung, Visualisierung von Energieflüssen. Damit sollten Energieverbräuche transparent gemacht, Nutzerinnen und Nutzer in die Systemnutzung eingebunden und zugleich die Grundlage für weitergehende, modellgestützte Regelstrategien geschaffen werden. Die digitale Ebene diente somit nicht nur der Beobachtung des Anlagenbetriebs, sondern war integraler Bestandteil der angestrebten Systemoptimierung im Realbetrieb.

Auf dieser Grundlage wurde ferner eine quartiersbezogene Modellierung und Regelung entwickelt und validiert. Ziel war es, Energieflüsse nicht nur auf Ebene einzelner Gebäude, sondern im Zusammenhang des Gesamtquartiers abzubilden. Auf Basis der realisierten Maßnahmen konnten unterschiedliche Transformationspfade bewertet, intelligente Betriebsstrategien entwickelt und wirtschaftliche sowie technische Szenarien abgeleitet werden. Damit erhielt das Vorhaben eine über den Einzelgebäudeansatz hinausgehende Perspektive, die für die spätere Übertragbarkeit auf andere Quartiere von zentraler Bedeutung ist.

Eine besondere Rolle kam dem Monitoring und der Validierung zu. In den Demonstratorgebäuden wurde ein umfassendes Monitoring installiert, mit dem die Simulationsergebnisse überprüft, reale Betriebszustände analysiert und Optimierungspotenziale identifiziert werden konnten. Das Monitoring diente damit nicht nur der Datenerfassung, sondern der wissenschaftlichen Absicherung der Projektergebnisse insgesamt. Gerade im Kontext eines denkmalgeschützten Bestands, in dem standardisierte Lösungen nur eingeschränkt anwendbar sind, war diese messtechnische Begleitung eine zentrale Voraussetzung für belastbare Aussagen zur technischen Funktionalität und energetischen Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen.

Abbildung 1 veranschaulicht die Zusammensetzung der Sanierungskomponenten und macht deutlich, dass das Maßnahmenbündel bewusst als integriertes System angelegt wurde. Neben der Innendämmung mit Aerogelputz und der Dämmung von Dach beziehungsweise oberster Geschossebene umfasst das dargestellte Konzept auch die Ertüchtigung von Fenstern und Außentüren sowie die thermische Trennung zwischen Keller und Wohnraum. Auf anlagentechnischer Seite sind insbesondere Fußbodenheizung und Wärmepumpe dargestellt; hinzu kommen Stromspeicher, Erdwärmesonden sowie thermisch-elektrisch aktivierte Dachsteine. Die Abbildung verdeutlicht damit, dass die energetische Optimierung nicht über eine Einzelmaßnahme, sondern nur über das abgestimmte Zusammenwirken von Hüllmaßnahmen, Anlagentechnik, regenerativer Energiegewinnung, Speicherung und digitaler Vernetzung verfolgt wurde (Abbildung 1).

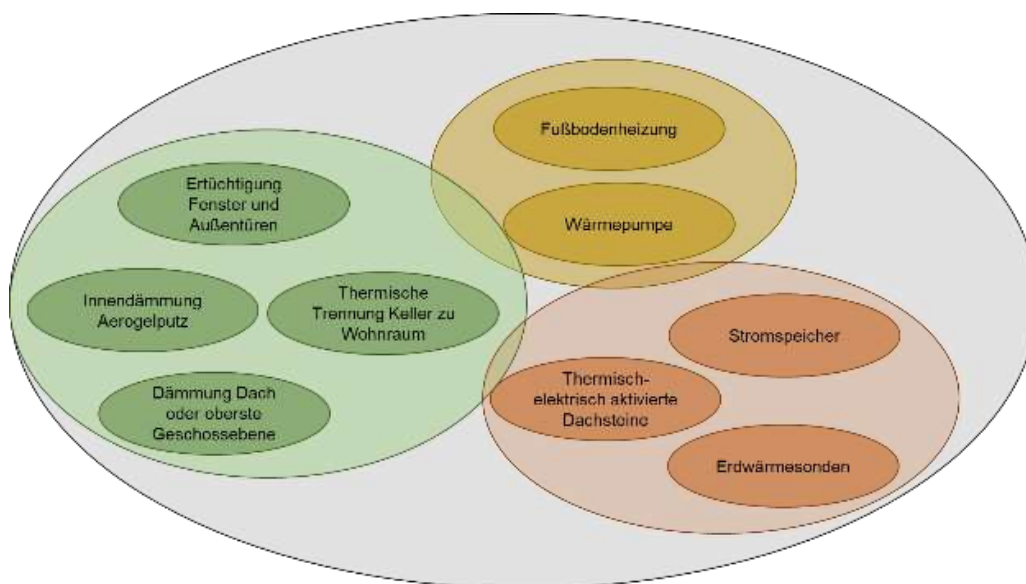


Abbildung 1: Zusammensetzung der Sanierungskomponenten

Insgesamt zeigen die realisierten Maßnahmen, dass energetische Optimierung und Denkmalschutz grundsätzlich miteinander vereinbar sind, sofern die Maßnahmen als integratives Gesamtsystem entwickelt, geplant und validiert werden. Das Vorhaben hat damit nicht nur die technische Funktionsfähigkeit einzelner innovativer Komponenten unter Realbedingungen aufgezeigt, sondern zugleich eine belastbare Grundlage für die mögliche Skalierung auf weitere Gebäude im Quartier und für die Übertragung auf vergleichbare Bestandsquartiere geschaffen.

II.3 Kostenstrukturen der Maßnahmen

Die im Rahmen des Verbundvorhabens „EnQM“ realisierten Maßnahmen waren überwiegend durch einen Demonstrations-, Entwicklungs- und Validierungscharakter geprägt. Ziel des Vorhabens war nicht die unmittelbare wirtschaftliche Optimierung einzelner Komponenten im Sinne einer marktüblichen Standardmodernisierung, sondern die wissenschaftlich-technische Erprobung, Systemintegration und Validierung innovativer Lösungen unter den Randbedingungen eines denkmalgeschützten Quartiers. Bereits aus diesem Grund sind die im Projekt angefallenen Kosten nur eingeschränkt mit den Kosten konventioneller Modernisierungsmaßnahmen vergleichbar.

Die projektbezogene Kostenstruktur wurde in besonderem Maße durch Faktoren beeinflusst, die über eine übliche investive Maßnahme hinausgehen. Hierzu zählen insbesondere Prototypenentwicklungen, messtechnische Begleitung, Monitoringinfrastruktur sowie zusätzliche Planungs-, Abstimmungs- und Genehmigungsprozesse, unter anderem im Zusammenhang mit denkmalpflegerischen Anforderungen. Die Kosten der im Projekt umgesetzten Maßnahmen sind daher nicht allein als Investitionskosten im engeren Sinne zu interpretieren, sondern teilweise auch als Forschungs-, Entwicklungs- und Absicherungskosten.

Ein wesentlicher Kostenblock entfiel auf Maßnahmen an der Gebäudehülle. Dazu gehörten insbesondere innenseitige Dämmmaßnahmen mit Hochleistungsdämmputz, die energetische Erüchtigung der Dachkonstruktionen sowie bauphysikalisch erforderliche Detaillösungen. Die Kosten dieser Maßnahmen lagen über denen konventioneller Außenwand- oder Dachsanierungen, da ausschließlich denkmalverträgliche und handwerklich anspruchsvolle Lösungen eingesetzt werden konnten. Hinzu kamen ein erhöhter Planungsaufwand, zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie bauphysikalische Begleituntersuchungen. Die spezifischen Mehrkosten sind somit nicht allein auf die Materialwahl zurückzuführen, sondern vor allem auf die hohen Anforderungen an Planung, Ausführung und Nachweisführung im denkmalgeschützten Bestand.

Auch im Bereich der Anlagentechnik ergaben sich gegenüber konventionellen Versorgungslösungen erhöhte Investitionskosten. Dies betrifft insbesondere Wärmepumpensysteme, Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme, hydraulische Anpassungen sowie die Einbindung von Speicherkomponenten. Die Kostenstruktur wurde hier nicht nur durch die Technik selbst, sondern in erheblichem Umfang auch durch den Aufwand für Systemintegration, Einregulierung und Schnittstellenmanagement zwischen Bestandsgebäude und innovativer Anlagentechnik bestimmt. Da die Umsetzungen im Projekt demonstratorischen Charakter hatten, ist zugleich davon auszugehen, dass bei einer späteren Serienanwendung deutliche Skaleneffekte erzielt werden können.

Besonders deutlich wird der Forschungscharakter des Vorhabens bei den aktivierten Dachsteinen. Die hierfür entstandenen Kosten resultierten nicht aus einer serienreifen Marktlösung, sondern aus der Entwicklung und Herstellung von Prototypen, der Integration von Photovoltaikmodulen und Leistungselektronik sowie aus ergänzenden Prüf- und Validierungsaufwänden. Die dabei angefallenen Stückkosten sind daher ausdrücklich nicht als repräsentativ für eine spätere Markteinführung oder großflächige Anwendung zu bewerten. Vielmehr handelt es sich bei diesen Kosten im Wesentlichen um Entwicklungsaufwand, der im Fall einer Standardisierung und Serienfertigung deutlich geringer anzusetzen wäre.

Ein weiterer wesentlicher Kostenbestandteil entfiel auf die Monitoring- und Messinfrastruktur. Hierzu zählten Raumklima- und Energiezähler, Datenbank- und Auswertungssysteme, Sensorik in Bauteilen sowie begleitende Messkampagnen. Diese Kosten sind nicht Bestandteil üblicher Sanierungsmaßnahmen, sondern als projektbezogene Forschungsinfrastruktur einzuordnen. Ihr hoher Anteil erklärt sich aus der wissenschaftlich erforderlichen Datendichte und dem Anspruch, die Wirksamkeit der Maßnahmen nicht nur konzeptionell, sondern auch messtechnisch belastbar nachzuweisen. Für die Beurteilung eines späteren Roll-outs dürfen diese Kosten daher nur eingeschränkt in Ansatz gebracht werden.

Für die Bewertung der Kostenstrukturen ist deshalb eine klare Trennung zwischen skalierbaren und nicht skalierbaren Kostenanteilen erforderlich. Zu den nicht ohne Weiteres übertragbaren Kostenbestandteilen zählen insbesondere Prototypen- und Entwicklungsaufwände, Mehrfachplanungen und Variantenuntersuchungen, wissenschaftliche Begleituntersuchungen, der erhöhte Koordinationsaufwand innerhalb des Verbundprojekts sowie demonstratorspezifische Einregulierungsphasen. Diese Positionen sind für die wissenschaftliche Zielerreichung des Vorhabens erforderlich gewesen, würden bei einer standardisierten Folgeanwendung jedoch voraussichtlich deutlich geringer ausfallen.

Gerade daraus ergibt sich das wirtschaftliche Skalierungspotenzial der entwickelten Ansätze. Bei einer Übertragung auf größere Gebäudebestände sind Reduktionen der Planungskosten durch Standardisierung, günstigere Beschaffungsbedingungen durch Serienfertigung, verkürzte Umsetzungszeiten sowie optimierte Schnittstellen zwischen den beteiligten Gewerken zu erwarten. Hinzu kommt, dass auch Einregulierungs- und Inbetriebnahmezeiten mit zunehmender Standardisierung reduziert werden können. Insbesondere für Wärmepumpentechnik, Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme und die Integration photovoltaischer Komponenten ist daher von deutlichen Kostendegressionen auszugehen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Kostenstruktur der im Projekt realisierten Maßnahmen wesentlich durch den Demonstrations- und Forschungscharakter des Vorhabens geprägt wurde. Die teilweise hohen spezifischen Investitionskosten einzelner Komponenten dürfen deshalb nicht unmittelbar als Maßstab für eine spätere Breitenanwendung verstanden werden. Zugleich konnte jedoch gezeigt werden, dass unter denkmalrechtlichen Randbedingungen technisch tragfähige und systemisch integrierte Lösungen realisierbar sind. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse schaffen damit eine belastbare Grundlage für die Vorbereitung wirtschaftlich tragfähiger Folgeumsetzungen, bei denen Standardisierung, Skalierungseffekte und angepasste Geschäftsmodelle eine zentrale Rolle spielen werden.

II.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse, der im Verbundvorhaben „EnQM“ entwickelten und umgesetzten Maßnahmen ist vor dem Hintergrund des Projektcharakters einzuordnen. Das Vorhaben war in wesentlichen Teilen auf die Entwicklung, Integration und Validierung innovativer LowEx-Technologien unter den besonderen Randbedingungen eines denkmalgeschützten Quartiers ausgerichtet. Eine klassische Wirtschaftlichkeitsanalyse im Sinne einer investiven Vollkostenrechnung für den Gesamtbestand konnte daher nicht in vollem Umfang durchgeführt werden. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Umsetzung nur exemplarisch an ausgewählten Gebäuden erfolgte, Prototypen und entwicklungsbedingte Sonderlösungen integriert wurden, zusätzliche Forschungs- und Monitoringkosten anfielen und eine vollständige Skalierung auf den Gesamtbestand von 586 Häusern nicht Gegenstand der praktischen Umsetzung war. Eine unmittelbare Übertragung der Demonstrator-Investitionskosten auf das Gesamtquartier wäre daher methodisch nicht belastbar.

Vor diesem Hintergrund kann die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen im Projektkontext nur in qualitativer Form und unter systemischer Perspektive bewertet werden. Für Maßnahmen an der Gebäudehülle, insbesondere die innenseitige energetische Ertüchtigung mittels Hochleistungsdämmputz, ist festzuhalten, dass die investiven Aufwendungen oberhalb konventioneller Außendämm Lösungen liegen. Gleichzeitig stellt diese Lösung unter denkmalpflegerischen Randbedingungen häufig die einzig zulässige energetische Ertüchtigungsoption dar. Wirtschaftliche Potenziale ergeben sich hier weniger aus niedrigen Anfangsinvestitionen als vielmehr aus der langfristigen Reduktion des Heizwärmebedarfs, der Absenkung erforderlicher Systemtemperaturen und der Verbesserung der bauphysikalischen Robustheit des Bestands.

Auch im Bereich der Wärmepumpentechnologie zeigen sich gegenüber konventionellen gasbasierten Heizsystemen zunächst höhere Investitionskosten. Die wirtschaftliche Bewertung darf sich jedoch nicht auf diesen Vergleich im engeren Sinne beschränken. Mittel- bis langfristige wirtschaftliche Potenziale entstehen durch geringere CO₂-bezogene Belastungen, eine tendenziell ungünstigere Entwicklung fossiler Brennstoffpreise, verbesserte Jahresarbeitszahlen bei Niedertemperaturbetrieb sowie durch die Möglichkeit der Kopplung mit gebäudebezogener Eigenstromerzeugung. Zugleich ist die Wirtschaftlichkeit solcher Systeme in hohem Maße vom Strompreinsniveau, von der jeweiligen Förderkulisse sowie von Lastprofil und energetischem Standard des betrachteten Gebäudes abhängig.

Für die im Projekt entwickelten aktivierten Dachsteine ist zu berücksichtigen, dass es sich um Prototypen und nicht um serienreife Marktlösungen handelt. Die im Projekt beobachteten Stückkosten sind daher wesentlich durch Forschungs- und Entwicklungsaufwand geprägt und können nicht als Maßstab für eine spätere Breitenanwendung dienen. Ein wirtschaftliches Potenzial ist hier vor allem perspektivisch zu sehen, etwa bei serieller Fertigung, bei der Integration in reguläre Dachsanierungen, bei der Kopplung mit Mieterstrommodellen sowie durch die teilweise Substitution konventioneller Dacheindeckungskosten. Die derzeitige Wirtschaftlichkeit ist folglich nicht aus dem Demonstrator heraus abschließend zu bewerten, wohl aber das grundsätzliche ökonomische Entwicklungspotenzial der Technologie.

Ähnliches gilt für Speicher- und Vernetzungskonzepte. Deren Wirtschaftlichkeit ist gegenwärtig in besonderem Maße von regulatorischen und marktlichen Rahmenbedingungen abhängig. Wirtschaftliche Effekte ergeben sich insbesondere durch eine Optimierung des Eigenverbrauchs, die Reduktion von Lastspitzen sowie – bei geeigneter regulatorischer Ausgestaltung – durch Potenziale bei Netzentgelten und Abgaben. Damit wird deutlich, dass die wirtschaftliche Bewertung von Speicherlösungen nicht losgelöst von Betriebsweise, Energiepreismodell und Systemeinbindung erfolgen kann.

Ein zentrales Ergebnis des Projekts besteht darin, dass die Wirtschaftlichkeit nicht auf Ebene einzelner Komponenten isoliert, beurteilt werden sollte. Vielmehr ist eine systemische Betrachtung erforderlich, in der Hüllverbesserung, Niedertemperaturbetrieb, Wärmepumpe, photovoltaische Integration, Speicher und intelligente Regelung in ihrem Zusammenwirken bewertet werden. Erst durch diese Kombination entstehen kumulative Effizienzgewinne, die in einer reinen Einzelkomponentenbetrachtung nicht sichtbar würden. Die wirtschaftliche Tragfähigkeit ergibt sich damit im Projektverständnis weniger aus einer singulären Technologie als aus dem abgestimmten Zusammenwirken mehrerer Maßnahmen innerhalb eines integrierten Versorgungskonzepts.

Für eine mögliche Übertragung auf größere Bestandsbereiche ist von relevanten Kostendegressionen auszugehen. Diese betreffen insbesondere standardisierte Planungsansätze, geringere Koordinationsaufwände, Vorteile aus Serienfertigung technischer Komponenten, optimierte Installationsprozesse sowie reduzierte Einregulierungszeiten. Gerade im Bereich der Wärmepumpentechnik, der Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme und der PV-Integration ist daher zu erwarten, dass sich die im Projekt beobachteten Kosten bei einer skalierten Anwendung deutlich

günstiger darstellen würden. Zugleich bleibt festzuhalten, dass eine belastbare Wirtschaftlichkeitsbewertung für den Gesamtbestand detaillierte Investitionskostenschätzungen auf Quartiers-ebene, realistische Energiepreisannahmen, die Berücksichtigung künftiger regulatorischer Rahmenbedingungen sowie die Einbeziehung möglicher Förderinstrumente voraussetzt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass im Rahmen des Vorhabens keine klassische Amortisations- oder Vollrenditerechnung für das Gesamtquartier vorgenommen werden konnte, da die Umsetzung ausschließlich demonstratorisch erfolgte. Gleichwohl konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Maßnahmen und Systemkombinationen unter denkmalrechtlichen Randbedingungen grundsätzlich technisch tragfähig und perspektivisch wirtschaftlich anschlussfähig sind. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse bilden damit eine fundierte Grundlage für nachfolgende, stärker standardisierte und wirtschaftlich optimierte Umsetzungsphasen, in denen die identifizierten, Skalierungs- und Degressionseffekte gezielt genutzt werden können.

II.5 Konzept für die messtechnische Begleitung

Die messtechnische Begleitung stellte einen zentralen Bestandteil des Verbundvorhabens dar und diente der wissenschaftlichen Absicherung der entwickelten Sanierungs-, Technologie- und Systemkonzepte. Ziel war es, die energetischen, bauphysikalischen und regelungstechnischen Effekte der umgesetzten Maßnahmen unter Realbedingungen systematisch zu erfassen, mit den im Projekt zugrunde gelegten Simulationsannahmen abzugleichen und daraus belastbare Aussagen zur Systemperformance sowie zu betrieblichen Optimierungspotenzialen abzuleiten. Das Monitoring war damit nicht als ergänzende Dokumentation, sondern als integraler Bestandteil des methodischen Gesamtansatzes konzipiert.

Die Konzeption der Messstrategie erfolgte mehrstufig und umfasste sowohl gebäudebezogene als auch quartiersbezogene Kenngrößen. Die Messkampagne wurde so aufgebaut, dass Aussagen zur Veränderung des Heizwärmebedarfs infolge der Hüllmaßnahmen, zur Effizienz und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpensysteme, zu Temperatur- und Feuchteverläufen in den Bauteilen, zu Eigenverbrauchsanteilen regenerativer Stromerzeugung, zu Lastgängen und Residuallasten im elektrifizierten System sowie zur Betriebsstabilität und zum Regelverhalten möglich waren. Damit wurde bereits auf Ebene des Messkonzepts sichergestellt, dass nicht nur Einzelkomponenten, sondern das Zusammenwirken von Gebäudehülle, Anlagentechnik, Stromerzeugung, Speicherung und Regelung bewertet werden konnte.

Die grundlegende Struktur des Messkonzepts ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht die hierarchische Gliederung der Messpunkte und zeigt, dass das Monitoring auf eine integrative Erfassung zentraler Zustands- und Betriebsgrößen ausgerichtet war. Erfasst wurden insbesondere Raumklimadaten wie Temperatur und relative Luftfeuchte, Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizsysteme, Wärmemengenströme, elektrische Leistungsdaten der Wärmepumpen, die photovoltaische Erzeugung, der Netzbezug sowie gegebenenfalls Speicherzustände. Ergänzend wurden in ausgewählten Bauteilen Sensoren zur Erfassung von Temperatur- und Feuchtegradienten integriert, um die bauphysikalische Sicherheit der innenseitigen Dämmmaßnahmen unter Betriebsbedingungen zu überprüfen und die hygrothermischen Modellannahmen zu validieren.

Die Auswahl der Messgrößen orientierte sich an den zuvor definierten Bewertungszielen und berücksichtigte sowohl kontinuierliche Langzeitmessungen als auch temporäre Detailmessungen. Tabelle 1 dokumentiert exemplarisch die Breite und Tiefe der installierten Messinfrastruktur. Der tabellarische Ausschnitt zeigt, dass die Sensorik nicht nur raumbezogen, sondern gezielt auch in konstruktiv und bauphysikalisch relevanten Bereichen positioniert wurde, etwa im Übergang zwischen Mauerwerk und Dämmputz, in der Armierungsebene, in Deckenbereichen, am Boden sowie im Bereich von Holzbalken. Damit wurde eine Datengrundlage geschaffen, die sowohl ener-

getische als auch hygrothermische und regelungstechnische Bewertungen ermöglicht. Während Raumtemperaturen und Luftfeuchten vorrangig der Komfort- und Feuchtebewertung dienen, erlaubten Wärmemengen- und elektrische Leistungsmessungen eine quantitative Bilanzierung; die Bauteilsensorik wiederum lieferte Aussagen zur hygrothermischen Sicherheit und zur Validierung der Simulationsmodelle.

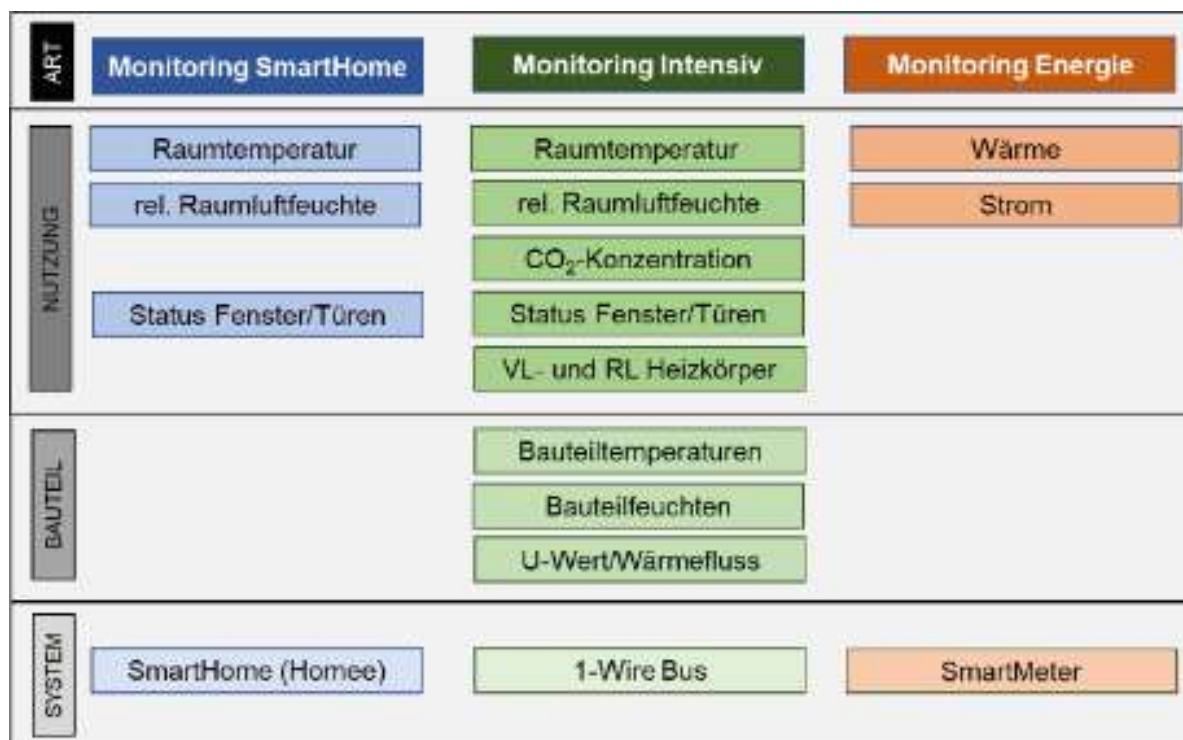


Abbildung 2: Konzeptionelle Bausteine

Tabelle 1: Ausschnitt Monitoringdatenpunkte

Baugruppe	Sensorart	Sensor-nummer	Raumnr.	Raumbez.	Fenster Nr.	Etage	Position	Anmerkungen Funktion x = ok
A13	D2	NT	0034	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk/Dämmputz 15 cm u. Decke	x
A13	C2	NF	0034	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk/Dämmputz 15 cm u. Decke	x
A14	A1	OT	S27	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk/Dämmputz 15 cm u. Decke	x
A12	D4	NT	0022	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm unter Decke	x
A12	C4	NF	0022	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm unter Decke	x
A14	A3	OT	S33	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm unter Decke	x
A12	D2	NT	0021	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm unter Decke	x
A12	C2	NF	0021	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm unter Decke	x
A17	A3	OT	S30	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - in Decke	x
A14	D4	NT	0026	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - in Decke	x
A14	C4	NF	0026	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - in Decke OT an Holzdielung	x
A16	A8	OT	S38	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk/Dämmputz 15 cm FOK	x
A13	D3	NT	0043	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm FOK	x
A13	C3	NF	0043	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm FOK	x
A15	A3	OT	S48	0.1	Wohnzimmer	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm FOK	x
A14	D1	NT	0044	0.1	Wohnzimmer	EG	auf Boden	x
A14	C1	NF	0044	0.1	Wohnzimmer	EG	auf Boden	x
A14	A6	OT	S49	0.1	Wohnzimmer	EG	auf Boden	x
A11	D4	NT	0049	0.1	Wohnzimmer	EG	Holzbalken - seitlich an Balken	x
A11	C4	NF	0049	0.1	Wohnzimmer	EG	Holzbalken - seitlich an Balken	x
A15	A1	OT	S28	0.1	Wohnzimmer	EG	Holzbalken - seitlich an Balken	x
A15	D3	HT	0023	0.1	Wohnzimmer	EG	in Balken	x
A15	C3	HF	0023	0.1	Wohnzimmer	EG	in Balken	x
A15	D2	NT	0017	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk / Dämmputz 15 cm u. Decke	x
A15	C2	NF	0017	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk / Dämmputz 15 cm u. Decke	x
A14	A2	OT	S25	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk / Dämmputz 15 cm u. Decke	x
A15	D1	NT	0014	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm u. Deckel	x
A15	C1	NF	0014	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm u. Decke	x
A14	A5	OT	S26	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm u. Decke	x
A15	D4	NT	0036	0.2	Küche	EG	in Decke	x
A15	C4	NF	0036	0.2	Küche	EG	in Decke	x
A17	A2	OT	S35	0.2	Küche	EG	in Decke	x
A10	D4	NT	0042	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk / Dämmputz - 15 cm FOK	x
A10	C4	NF	0042	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk / Dämmputz - 15 cm FOK	x
A15	A5	OT	S18	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Mauerwerk / Dämmputz - 15 cm FOK	x
A10	D1	NT	0019	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm FOK	x
A10	C1	NF	0019	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm FOK	x
A14	A7	OT	S07	0.2	Küche	EG	Außenwand Nord - Dämmputz/Armierung 15 cm FOK	x
A13	D4	NT	0046	0.2	Küche	EG	auf Boden	x
A13	C4	NF	0046	0.2	Küche	EG	auf Boden	x
A16	A6	OT	S24	0.2	Küche	EG	auf Boden	x
A11	D2	NT	0038	0.2	Küche	EG	Holzbalken - seitlich an Balken	x
A11	C2	NF	0038	0.2	Küche	EG	Holzbalken - seitlich an Balken	x
A15	A7	OT	S19	0.2	Küche	EG	Holzbalken - seitlich an Balken	x

Die Sensorik wurde so installiert, dass eine hohe Datendichte bei zugleich robuster Betriebsführung erreicht werden konnte. Die Messdaten wurden automatisiert erfasst, zentral gespeichert und regelmäßig plausibilisiert. Gerade bei Langzeitmessungen erwies sich die kontinuierliche Qualitätskontrolle als wesentlich, um Sensordrift, Ausfälle oder Übertragungsfehler frühzeitig zu erkennen und die Datenbasis für die nachgelagerten Auswertungen belastbar zu halten. Die Datenstruktur wurde zudem so angelegt, dass eine direkte Kopplung mit den Simulationsmodellen möglich war. Dadurch konnten reale Betriebsdaten für die Kalibrierung und Validierung der energetischen Modelle herangezogen werden, was einen wesentlichen methodischen Mehrwert des Vorhabens darstellt.

Im Verlauf der Betriebsphase zeigte sich darüber hinaus, dass die messtechnische Begleitung nicht ausschließlich der nachträglichen Erfolgskontrolle diente, sondern zugleich ein aktives Optimierungsinstrument war. Insbesondere während der Einregulierungsphase der Wärmepumpensysteme und der digitalen Regelung konnten auf Grundlage der Messdaten Anpassungen vorgenommen werden, die zu einer Stabilisierung des Betriebs und zu Effizienzsteigerungen führten. Gleichzeitig bestätigte die kontinuierliche Erfassung von Temperatur- und Feuchteverläufen in den Bauteilen die bauphysikalische Sicherheit der innenseitigen Dämmmaßnahmen. Darüber hinaus konnten saisonale Effekte sowie nutzerbedingte Einflüsse differenziert ausgewertet und in die Gesamtbewertung einbezogen werden.

Insgesamt hat sich das entwickelte Konzept der messtechnischen Begleitung als tragfähig und zielführend erwiesen. Die systematische Erfassung energetischer und bauphysikalischer Kenngrößen ermöglichte eine belastbare Validierung der entwickelten Maßnahmen und lieferte fundierte Aussagen zur Systemperformance im Realbetrieb. Während Abbildung 2 die integrative Struktur des Messsystems verdeutlicht, dokumentiert Tabelle 1 die methodische Breite und die räumliche Tiefe der installierten Messpunkte. Beide Elemente sind damit für das Verständnis der energetischen Bewertung und der durchgeführten Validierungsschritte von zentraler Bedeutung. Die messtechnische Begleitung stellt folglich einen wesentlichen wissenschaftlichen Mehrwert des Vorhabens dar und bildet zugleich eine tragfähige Grundlage für künftige Skalierungs- und Transferprojekte im denkmalgeschützten Bestand.

II.6 Überblick über die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse

Die nachfolgenden Ausführungen geben einen strukturierten Überblick über die im Rahmen des Verbundvorhabens „EnQM“ erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse. Ziel dieses Kapitels ist es, die wesentlichen fachlichen Erkenntnisse aus den Bereichen Bauphysik, anlagentechnische Systementwicklung, Systemintegration und quartiersbezogene Modellierung in ihrem Zusammenhang darzustellen und ihren Beitrag zur energetischen Transformation denkmalgeschützter Wohnquartiere einzuordnen. Im Mittelpunkt stehen dabei nicht allein Einzelresultate der jeweiligen Projektpartner, sondern insbesondere die methodischen Entwicklungen, die technologischen Innovationen sowie die durch Simulation, Demonstratorumsetzung und messtechnische Begleitung abgesicherten Wirkungsnachweise.

Die Ergebnisdarstellung folgt der Gliederung der Teilprojekte und bildet damit zugleich die innere Logik des Gesamtvorhabens ab: von der bauphysikalischen und konzeptionellen Grundlagenarbeit über die Entwicklung und Erprobung denkmalgerechter Technologien und deren quartiersbezogene Systemintegration bis hin zur exemplarischen Umsetzung im Bestand. Auf diese Weise wird deutlich, dass die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse nicht als voneinander unabhängige Einzelergebnisse zu verstehen sind, sondern als aufeinander aufbauende Beiträge zu einem integrierten Transformationsansatz für den denkmalgeschützten Gebäudebestand.

II.6.1 Teilprojekt 1 – Ganzheitliche Sanierungskonzepte für Baudenkmale

TP 1 bildete die bauphysikalische, methodische und konzeptionelle Grundlage des Gesamtvorhabens. Ausgangspunkt war die Fragestellung, wie für den denkmalgeschützten Gebäudebestand der Margarethenhöhe wissenschaftlich fundierte und zugleich denkmalverträgliche Sanierungskonzepte entwickelt werden können, die nicht nur auf die Verbesserung einzelner Bauteile abzielen, sondern das Gebäude als energetisch und bauphysikalisch zusammenhängendes System betrachten. Im Vordergrund stand daher von Beginn an eine integrative Herangehensweise, in der Gebäudehülle, thermisches Verhalten, Nutzungsbedingungen, Anlagentechnik und denkmalpflegerische Randbedingungen gemeinsam bewertet wurden.

Vor dem Hintergrund der besonderen Ausgangslage des Quartiers – historisch wertvoller Gebäudebestand, heterogene technische Ausstattung, begrenzte Eingriffsmöglichkeiten und zugleich hoher energetischer Transformationsbedarf – kam TP 1 die Aufgabe zu, zunächst eine belastbare fachliche Entscheidungsgrundlage für alle weiteren Projektarbeiten zu schaffen. Dazu gehörten detaillierte Bestandsanalysen der Gebäude, die Erfassung konstruktiver, anlagentechnischer und energetischer Randbedingungen, der Einbau und Betrieb von Monitoringtechnik zur Gewinnung belastbarer Raumklima- und Energiedaten sowie die Durchführung thermisch-hygrischer und dynamischer thermischer Simulationen. Auf dieser Grundlage sollten Sanierungsvarianten entwickelt und bewertet werden, insbesondere im Hinblick auf die innenseitige Hüllertüchtigung, die Reduktion von Transmissionswärmeverlusten, die bauphysikalische Sicherheit sowie die Vorbereitung eines Niedertemperaturbetriebs.

Die zentrale wissenschaftlich-technische Leistung von Teilprojekt 1 bestand damit nicht allein in der Analyse des Bestands, sondern in der systematischen Verknüpfung von Bestandsaufnahme, Monitoring, Simulation und Variantenentwicklung. Erst durch dieses Vorgehen konnten die besonderen Anforderungen des denkmalgeschützten Quartiers in belastbare Sanierungsstrategien übersetzt werden. TP 1 übernahm damit eine Schlüsselfunktion innerhalb des Verbundvorhabens: Einerseits wurden die Grenzen und Potenziale energetischer Eingriffe im historischen Bestand präzise herausgearbeitet, andererseits wurden die fachlichen Voraussetzungen für die technologische Weiterentwicklung in Teilprojekt 2 sowie für die quartiersbezogene Modellierung

und Bewertung in Teilprojekt 3 geschaffen. Die Ergebnisse von TP 1 sind somit nicht als isolierter Vorlauf, sondern als inhaltliches Fundament des Gesamtprojekts zu verstehen.

Im Folgenden werden die innerhalb von Teilprojekt 1 bearbeiteten Arbeitspakete in ihrer fachlichen Logik dargestellt. Den Ausgangspunkt bildet die Bestandsdatenanalyse der Gebäude, in der die siedlungs- und gebäudebezogenen Grundlagen, die konstruktiven Merkmale, der energetische Ausgangszustand sowie die für die weiteren Untersuchungen maßgeblichen Randbedingungen systematisch aufgearbeitet wurden. Darauf aufbauend werden die Monitoring- und Untersuchungsarbeiten im Bestand, die Energiebedarfsberechnungen, die hygrothermischen Untersuchungen der Gebäudehülle, die thermischen Gebäudesimulationen sowie die daraus abgeleiteten integrativen Sanierungskonzepte dargestellt. Dadurch wird Teilprojekt 1 als zusammenhängender fachlicher Entwicklungsstrang nachvollziehbar, aus dem die weiteren wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Vorhabens unmittelbar hervorgehen.

Zu Beginn von Teilprojekt 1 stand die systematische Bestandsdatenanalyse der Gebäude des denkmalgeschützten Quartiers Margarethenhöhe. Ziel dieses Arbeitspakets war es, eine belastbare fachliche Grundlage für die nachfolgenden bauphysikalischen, energetischen und messtechnischen Untersuchungen zu schaffen. Hierzu wurde der Gebäudebestand nicht lediglich beschreibend erfasst, sondern im Hinblick auf diejenigen Merkmale ausgewertet, die für die energetische Bewertung und die spätere Entwicklung von Sanierungskonzepten maßgeblich sind. AP 1.1 hatte damit eine grundlegende Orientierungs- und Strukturierungsfunktion innerhalb des gesamten Teilprojekts.

Ausgangspunkt war die Beobachtung, dass die Margarethenhöhe trotz ihres insgesamt einheitlichen siedlungs- und baugeschichtlichen Charakters keine vollständig homogene Gebäudestruktur aufweist. Zwar folgen zahlreiche Gebäude ähnlichen typologischen und konstruktiven Grundprinzipien, gleichwohl bestehen relevante Unterschiede etwa hinsichtlich Gebäudetyp, Anzahl der Wohneinheiten, Grundrissausrichtung, Anbausituation, Fassadenausbildung, Außenwandkonstruktion sowie Sockelausbildung. Hinzu treten denkmalpflegerisch relevante Besonderheiten, etwa erhaltene Originalfenster oder abweichende Fassadenmaterialitäten wie Sichtmauerwerk oder Naturstein. Diese Unterschiede sind für die energetische Bewertung deshalb von hoher Relevanz, weil sie die solaren Gewinne, die Transmissionswärmeverluste und die Möglichkeiten einer denkmalverträglichen Sanierung in unterschiedlicher Weise beeinflussen.

Im Rahmen von AP 1.1 wurde deshalb eine fortschreibbare Informationsgrundlage aufgebaut, die den Gebäudebestand in strukturierter Form beschreibt und für alle Verbundpartner nutzbar macht. Diese Bestandsübersicht diente nicht als Ersatz für die spätere objektspezifische Detailuntersuchung, wohl aber als methodische Grundlage für die Auswahl repräsentativer Untersuchungsobjekte und für die weitere Clusterbildung innerhalb des Projekts. Dabei zeigte sich zugleich, dass eine abschließende, einheitliche Typisierung zu diesem frühen Bearbeitungszeitpunkt noch nicht möglich war. Ohne vertiefte Kenntnisse der tatsächlichen Baukonstruktion und Anlagentechnik ließ sich der Bestand nicht abschließend in starre Klassen überführen. Die in AP 1.1 vorgenommene Systematisierung war daher bewusst so angelegt, dass sie im weiteren Projektverlauf ergänzt und je nach Schwerpunktsetzung der nachfolgenden Arbeitspakete weiter ausdifferenziert werden konnte.

Für die im Anschluss vorgesehene Vorauswahl der Monitoringobjekte wurden in AP 1.1 daher gezielt diejenigen Gebäude identifiziert, die sich in zentralen Eigenschaften unterscheiden. Berücksichtigt wurden insbesondere die Anzahl der Wohneinheiten, die Hauptausrichtung des Grundrisses, die Anbausituation, die Außenwandkonstruktion sowie Art und Höhe des Sockels. Diese Parameter wurden deshalb als wesentlich eingestuft, weil sie den Energiebedarf in erheblichem Maße beeinflussen, ohne unmittelbar vom individuellen Nutzerverhalten oder vom jeweils

vorhandenen Wärmeerzeuger abhängig zu sein. Die Objektgröße wurde demgegenüber nur über die Zahl der Wohneinheiten differenziert, da die Grundrisse der typischen Gebäude weitgehend übereinstimmen und sich die Nutzflächen nur vergleichsweise gering unterscheiden. Auf diese Weise konnte bereits im Rahmen der Bestandsdatenanalyse eine Auswahl vorbereitet werden, die eine möglichst breite Spannweite relevanter bauphysikalischer und energetischer Randbedingungen des Quartiers abbildet.

Ein weiterer zentraler Bestandteil von AP 1.1 war die erste energetische Einordnung des Bestands. Da für die Gebäude aufgrund des Denkmalschutzes keine Energieausweise vorliegen und zudem keine objektscharfen Verbrauchsdaten verfügbar waren, weil die Mieterinnen und Mieter ihren Gasbezug über individuelle Verträge mit den Stadtwerken abwickeln, musste hierfür ein indirekter Ansatz gewählt werden. Unter Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Vorgaben konnten für bestimmte Gebäudegruppen jedoch durchschnittliche Gasbezugswerte ausgewertet und für die energetische Orientierung herangezogen werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Sie zeigen für die betrachteten Mehrfamilienhäuser einen mittleren jährlichen Gasenergiebedarf von etwa 95 m³/m². Dieser Wert wurde im Projekt nicht als abschließende Bewertung einzelner Gebäude verstanden, sondern als belastbare Orientierungsgröße für die energetische Einordnung des Bestands und als Referenz für die nachfolgenden Simulationen und Bewertungsverfahren (Abbildung 3).

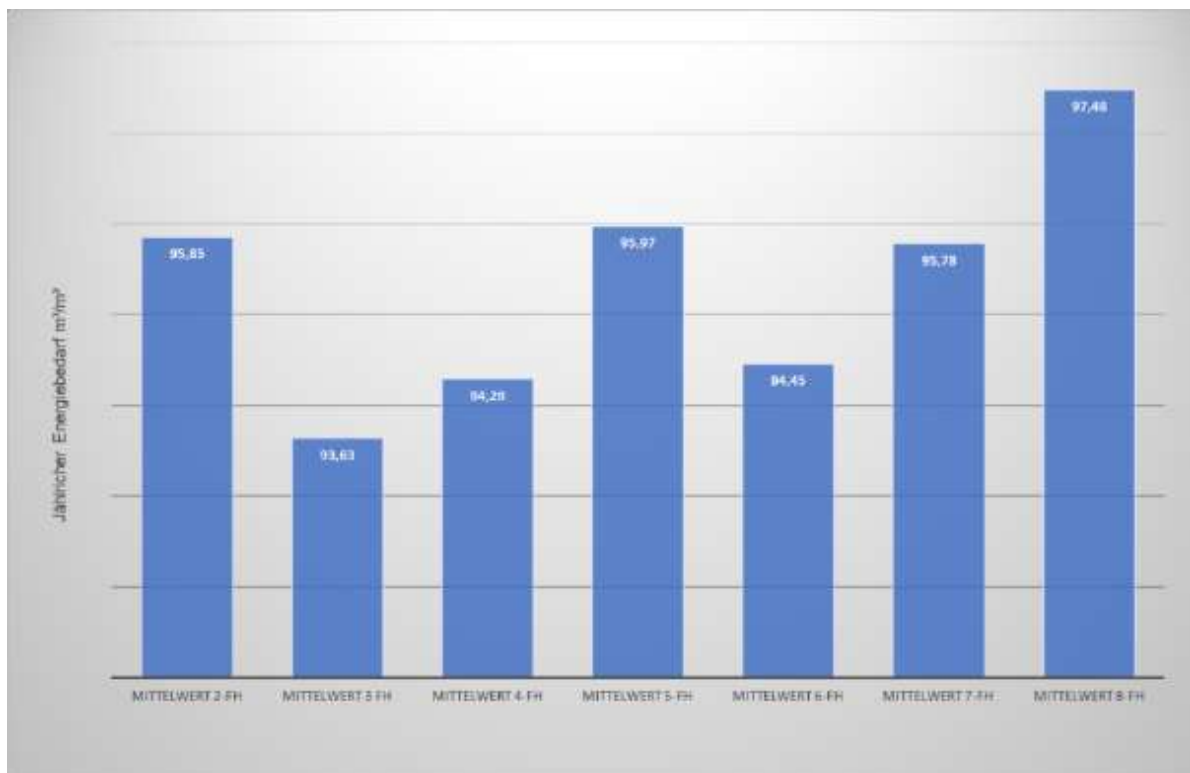


Abbildung 3: Jährlicher Energiebedarf pro Jahr – Mehrfamilienhäuser

Damit erfüllt AP 1.1 im Gesamtzusammenhang von Teilprojekt 1 eine doppelte Funktion: Zum einen wurde eine strukturierte Bestandsgrundlage geschaffen, die die Heterogenität des denkmalgeschützten Quartiers in den für das Projekt relevanten Merkmalen systematisch erfasst. Zum anderen wurden aus dieser Bestandsanalyse bereits die wesentlichen Auswahlkriterien für die vertieften Untersuchungen abgeleitet. Gerade diese Überführung von der deskriptiven Bestandserfassung in eine projektbezogene Auswahl- und Bewertungslogik ist für die weitere Bearbeitung entscheidend. Denn erst auf ihrer Grundlage konnten die Objekte im nächsten Schritt typologisch

geclustert, bauphasenbezogen eingeordnet und für das Monitoring sowie die vertieften Untersuchungen ausgewählt werden.

Vor diesem Hintergrund schließt AP 1.2 unmittelbar an die in AP 1.1 entwickelte Bestandslogik an. Während in AP 1.1 die strukturierende Erfassung und energetische Erstbewertung des Quartiers im Vordergrund stand, werden in AP 1.2 die ausgewählten Gebäude typologisch und bauphasenbezogen weiter differenziert, messtechnisch erschlossen und durch Bauwerksuntersuchungen vertieft analysiert. Die bauphasenbezogene Einordnung anhand des von der Margarethe Krupp-Stiftung beauftragten Bauphasenplans bildet dabei eine wesentliche methodische Brücke zwischen beiden Arbeitspaketen und wird in Abbildung 4 weitergeführt.

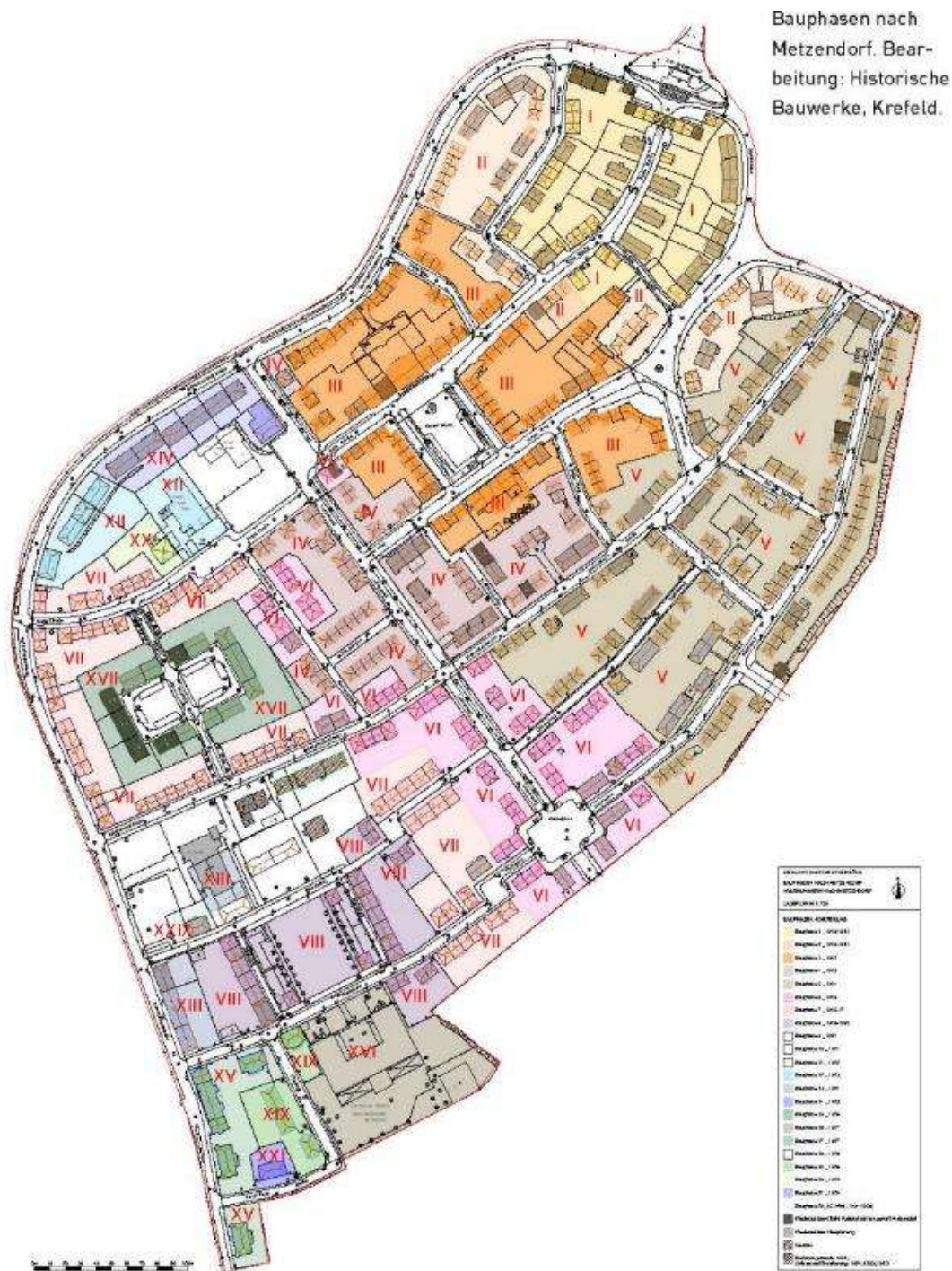


Abbildung 4: Bauphasen nach Metzendorf [1]

Aufbauend auf der in AP 1.1 vorgenommenen Bestandsdatenanalyse wurde in AP 1.2 der Schritt von der strukturierenden Erfassung des Quartiers zur vertieften messtechnischen und konstruktiven Untersuchung ausgewählter Gebäude vollzogen. Ziel war es, aus der Vielzahl der Gebäude der denkmalgeschützten Margarethenhöhe eine solche Auswahl zu treffen, die die wesentlichen bauphysikalischen, energetischen und nutzungsbezogenen Randbedingungen des Quartiers möglichst repräsentativ abbildet. Hierfür wurden die Gebäude zunächst typologisch geclustert. Die Differenzierung erfolgte nach Gebäudetyp, städtebaulicher Einbindung sowie bauhistorischem Status. Ergänzend wurde eine bauphasenbezogene Einordnung vorgenommen, für die der von der Margarethe Krupp-Stiftung beauftragte Bauphasenplan herangezogen wurde. Diese Einordnung war erforderlich, weil sich Konstruktion, Materialwahl und Detaillausbildung in Abhängigkeit vom Entstehungszeitraum unterscheiden können. Der entsprechende Zusammenhang wird durch den Bauphasenplan in Abbildung 4 veranschaulicht.

Aufbauend auf der in AP 1.1 vorgenommenen Bestandsanalyse wurden in AP 1.2 zunächst diejenigen Gebäude ausgewählt, an denen das Monitoring sowie die vertieften Untersuchungen durchgeführt werden sollten. Die Auswahl zielte darauf ab, unterschiedliche Gebäudetypen, Bauphasen, Anbausituationen und Wiederaufbaustrukturen des denkmalgeschützten Bestands abzubilden. Die hierfür herangezogenen Objekte sind in Tabelle 2 dokumentiert. Damit wurde eine belastbare Stichprobe geschaffen, die die Spannweite der bauphysikalischen und energetischen Randbedingungen innerhalb der Margarethenhöhe repräsentiert.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Objekte

Adresse	Art des Monitorings
Metzendorfstr. 38A	Energie + SmartHome
Metzendorfstr. 38B	Energie + SmartHome
Metzendorfstr. 38C	Energie + Intensiv
Stensstraße 17	Energie + Intensiv
Laubenweg 22 EG	Energie + SmartHome
Laubenweg 22 OG	Energie + Intensiv
Sonnenblick 6 EG	Energie + Intensiv
Sonnenblick 6 OG	Energie + Intensiv
Hoher Weg 18	Energie + Intensiv
Hoher Weg 20	Energie + SmartHome
Laubenweg 42	Energie + SmartHome
Trautes Heim 2A	Energie + SmartHome
Waldlehne 88	Energie + SmartHome

Das Monitoring war als mehrstufiges Messkonzept angelegt und sollte nicht nur den Ist-Zustand dokumentieren, sondern eine quantitative Grundlage für die spätere Auslegung der Anlagentechnik, die Kalibrierung von Simulationsmodellen und die Bewertung des Nutzer- und Betriebsverhaltens liefern. Die Grundstruktur ist in Abbildung 2 dargestellt. Erkennbar wird dort die Differenzierung in Monitoring SmartHome, Monitoring Intensiv und Monitoring Energie. Das SmartHome-Monitoring war auf Raumklima und Öffnungszustände von Fenstern und Türen ausgerichtet, das Intensivmonitoring auf eine vertiefte Erfassung von Raumklima, CO₂, Heizkörpertemperaturen sowie bauphysikalischen Zustandsgrößen, während das Energiemonitoring die Energiebezüge für Wärme und Strom erfasste. Diese Aufteilung ist methodisch folgerichtig, weil sie eine abgestufte Datentiefe je nach Fragestellung ermöglicht und zugleich den Aufwand im bewohnten Bestand begrenzt.

Die konkrete Ausführung des Energiemonitorings wird in Abbildung 5 verdeutlicht. Die Abbildung zeigt, dass die Zähler so angeordnet wurden, dass die Energiebezüge der einzelnen Wohnungen

möglichst getrennt erfasst werden konnten und gleichzeitig eine gute Zugänglichkeit über die Kellerräume gewährleistet war. Damit wurde eine wichtige Voraussetzung für die spätere differenzierte Auswertung geschaffen, weil nur auf dieser Grundlage gebäude- und wohnungsbezogene Verbräuche getrennt betrachtet werden können. Gerade in einem heterogenen Bestand mit unterschiedlichen Nutzungsprofilen ist diese Trennung für die Bewertung der energetischen Ausgangslage und für die Vergleichbarkeit der Messdaten wesentlich.

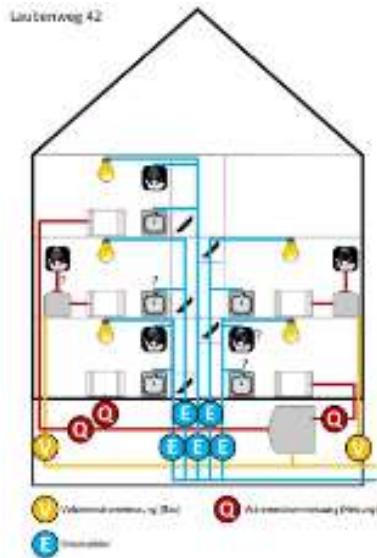


Abbildung 5: Energiemonitoring im Gebäude

Das SmartHome-Monitoring wurde in vier Einfamilienhäusern sowie in zwei Mehrfamilienhäusern mit insgesamt neun Wohnungen installiert. Jeder Raum wurde mit Sensoren für Temperatur und relative Luftfeuchte ausgestattet; zusätzlich wurden Fenster und teilweise Türen mit Magnetkontakten versehen. Die räumliche Dokumentation dieser Messstellen ist in Abbildung 6 dargestellt. Methodisch wichtig ist dabei, dass zwar insgesamt 344 Datenpunkte vorgesehen waren, die beauftragte Firma jedoch nur Datenfragmente lieferte. Im Ergebnis zeigte sich damit, dass marktübliche SmartHome-Systeme zwar für wohnungsnahen Zustandsinformationen geeignet sein können, für wissenschaftliche Langzeituntersuchungen jedoch nur eingeschränkt belastbar sind.

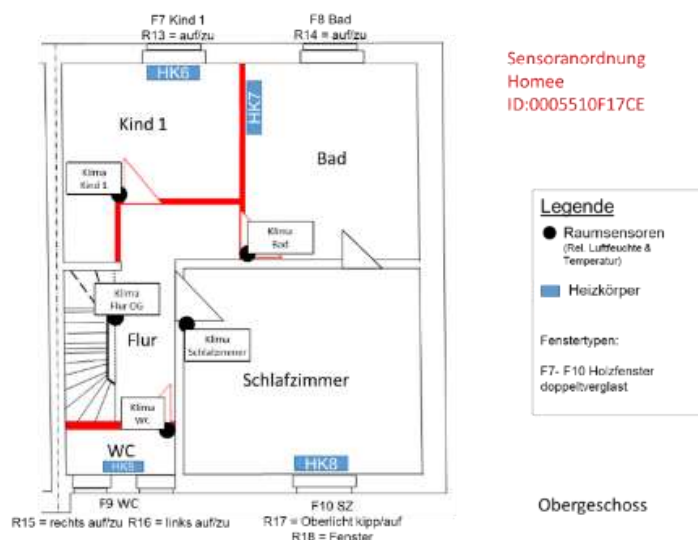


Abbildung 6: Klimamonitoring mit SmartHome-System (exemplarische Dokumentation)

Abbildung 12 die gemessenen Verbrauchsdaten für diejenigen Gebäude zusammen, für die vollständige Jahresdatensätze aus 2020 und/oder 2021 vorlagen. Diese bilden die Brücke zwischen Monitoring und späterer energetischer Bewertung, weil sie reale Verbrauchsmuster des Bestands sichtbar machen und damit eine empirische Vergleichsebene für die Simulationen bereitstellen.

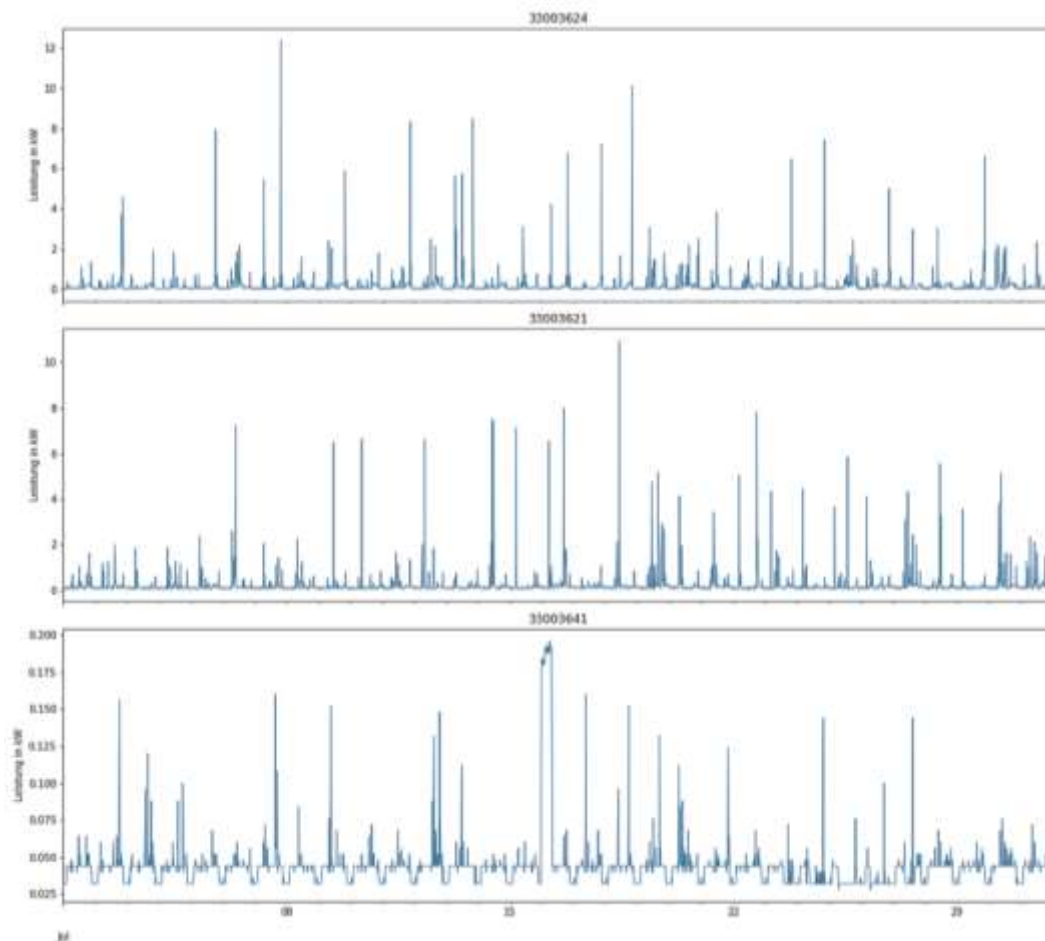


Abbildung 9: Leistungskurven der Stromzähler eines Zweifamilienhauses für Juli 2019

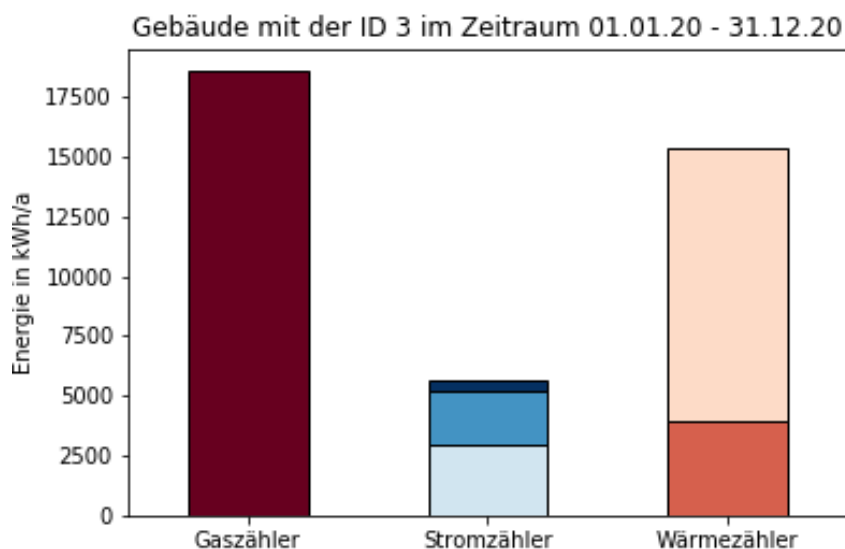


Abbildung 10: ermittelter Verbrauch der Smart Meter für ein Gebäude im Zeitraum des Jahres 2020

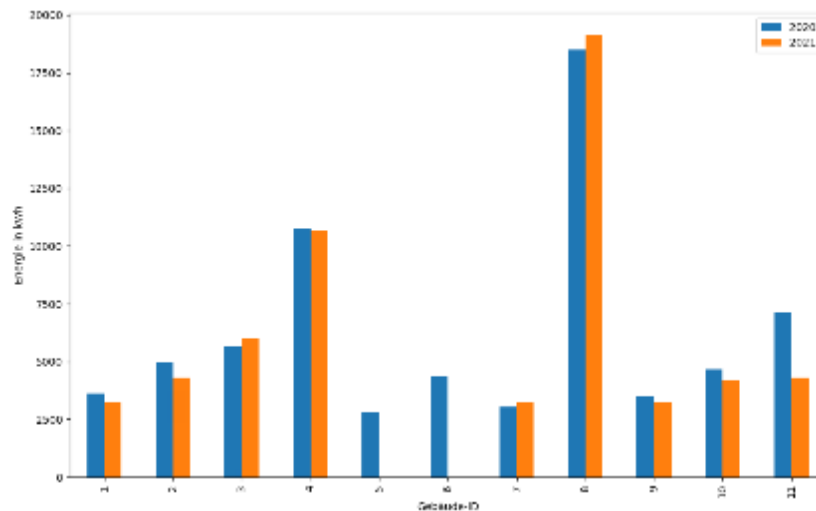


Abbildung 11: Stromverbrauch der Gebäude, bei denen für die kompletten Jahre 2020 und/oder 2021 Verbrauchsdaten erhoben werden konnten

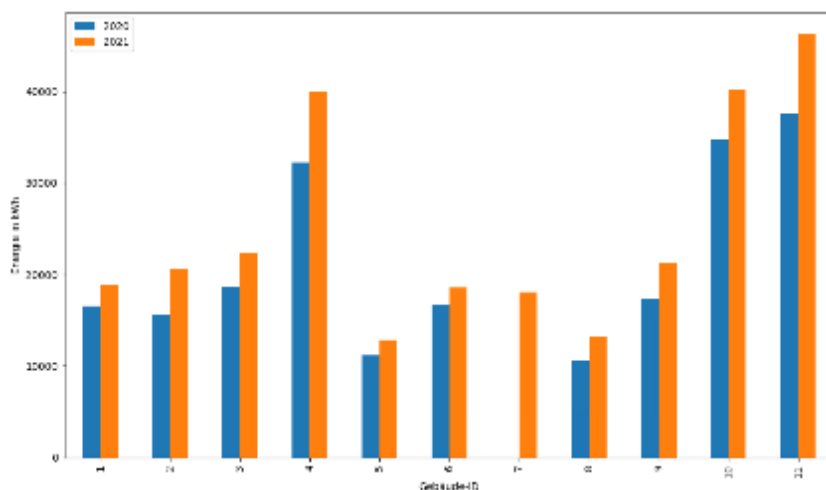


Abbildung 12: Gasverbrauch der Gebäude, bei denen für die kompletten Jahre 2020 und/oder 2021 Verbrauchsdaten erhoben werden konnten.

Für die projektinterne Nutzbarkeit der Daten wurden zusätzlich Werkzeuge zur Visualisierung und Auswertung geschaffen. Erst durch die kontinuierliche Sichtbarmachung der Daten konnten Auffälligkeiten erkannt, Betriebszustände bewertet und die Daten für die weiteren Arbeitspakete unmittelbar nutzbar gemacht werden.

Die praktische Aussagekraft des Intensivmonitorings wurde schließlich anhand des Objekts Hoher Weg 18 verdeutlicht. Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen exemplarisch, wie Heizbetrieb, Raumklima, Luftqualität und Lüftungsverhalten zusammen ausgewertet werden konnten. Gerade diese Kopplung verschiedener Messgrößen ist für die Interpretation des Bestandsverhaltens wesentlich: Temperatur- und Feuchteverläufe lassen sich nur dann belastbar bewerten, wenn gleichzeitig Informationen zu Heizkörperbetrieb, CO₂-bedingtem Lüftungsverhalten und Fensteröffnungen vorliegen. Diese Klimadaten wurden zur Auslegung und Planung der Anlagentechnik genutzt, insbesondere zur realitätsnahen Bestimmung der Heizlasten der zu sanierenden Gebäude. Das Monitoring war damit nicht nur beobachtend, sondern unmittelbar planungsrelevant.

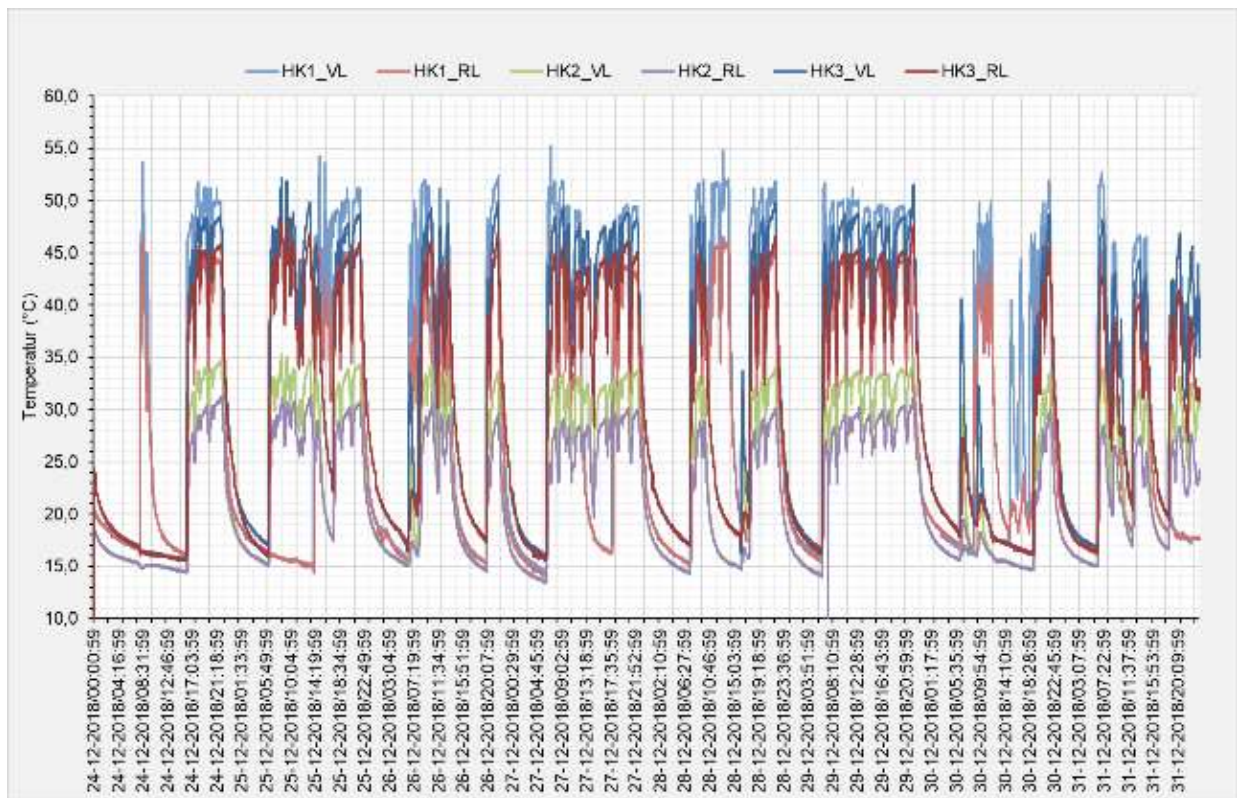


Abbildung 13: Vor- und Rücklauftemperaturen Heizkörper Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18

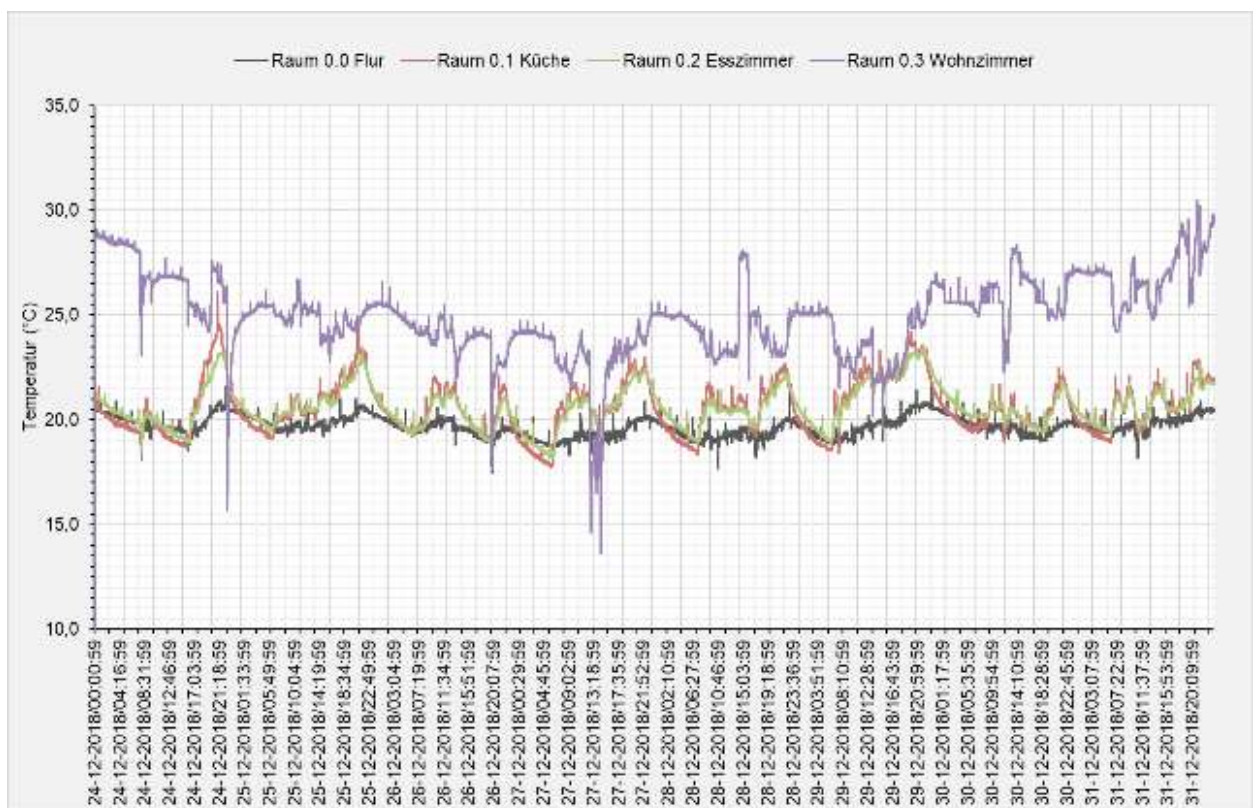


Abbildung 14: Raumtemperaturen Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg

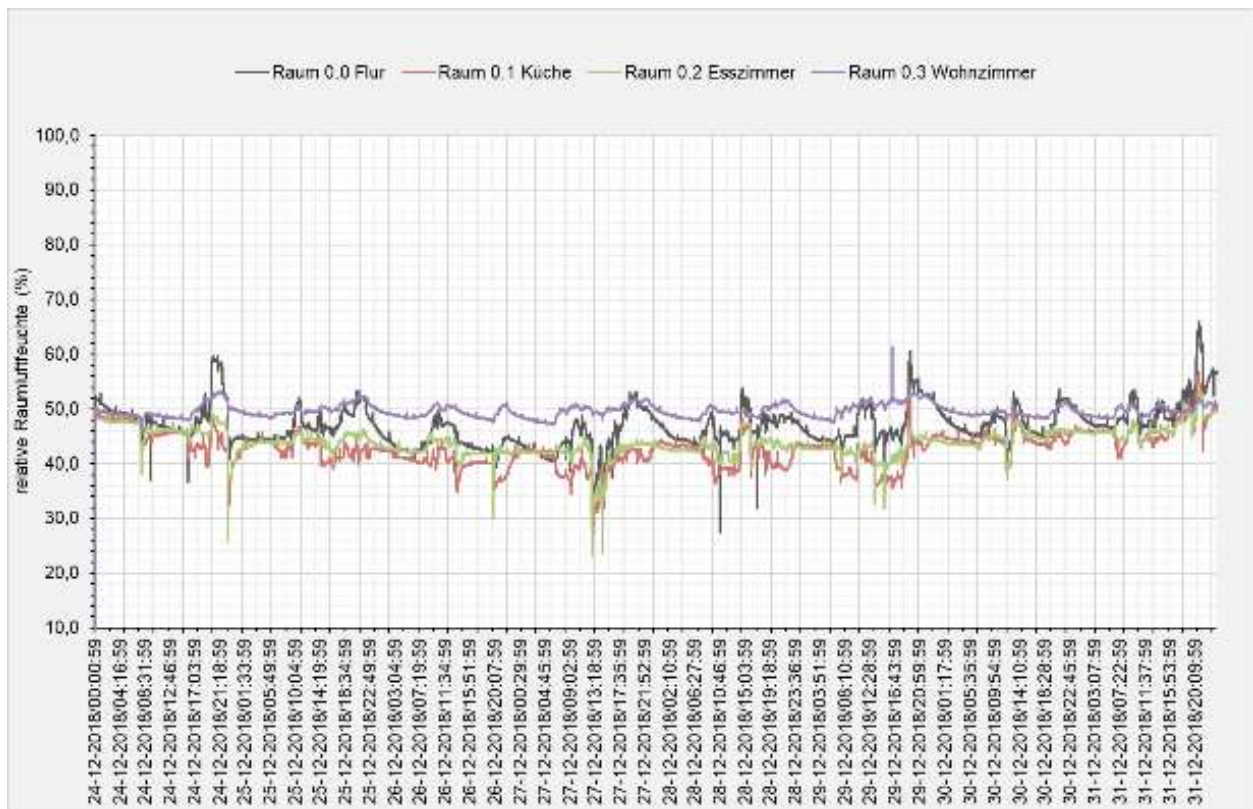


Abbildung 15: Relative Raumluftfeuchte Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18

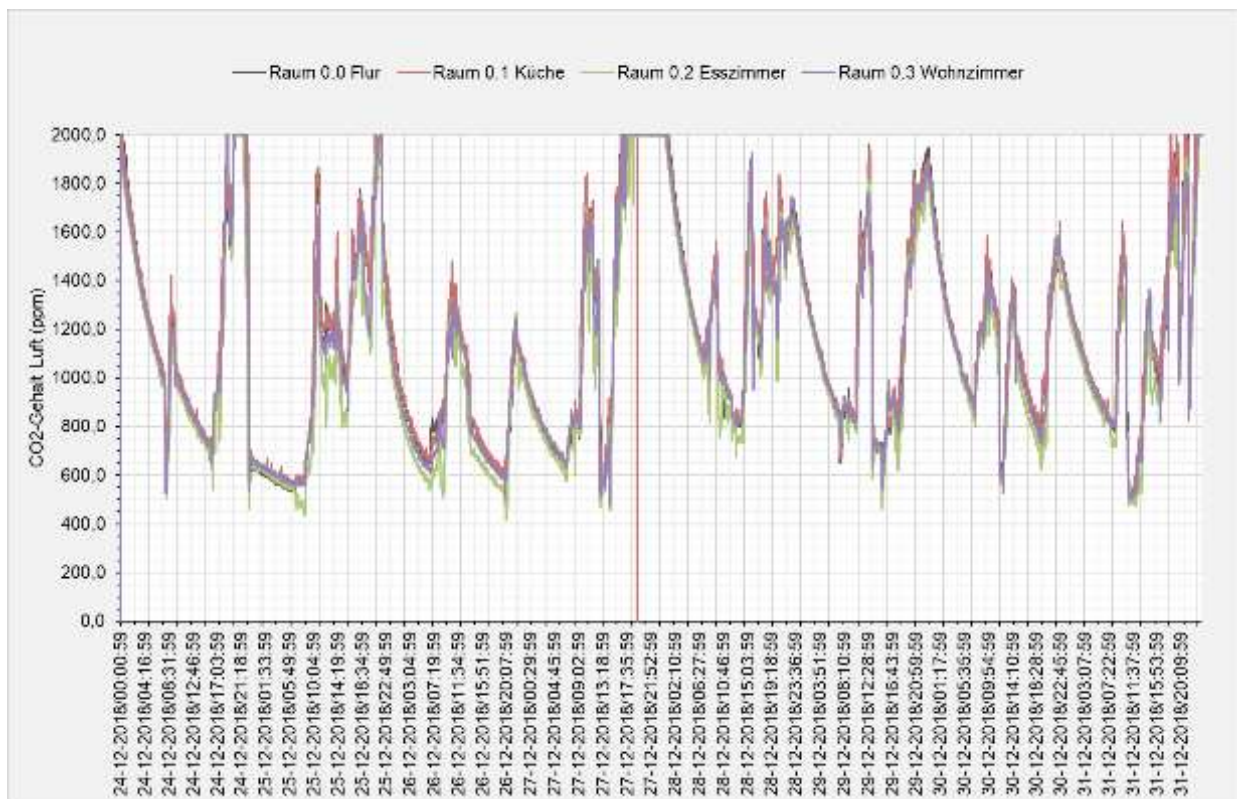


Abbildung 16: CO2-Gehalt Luft Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18

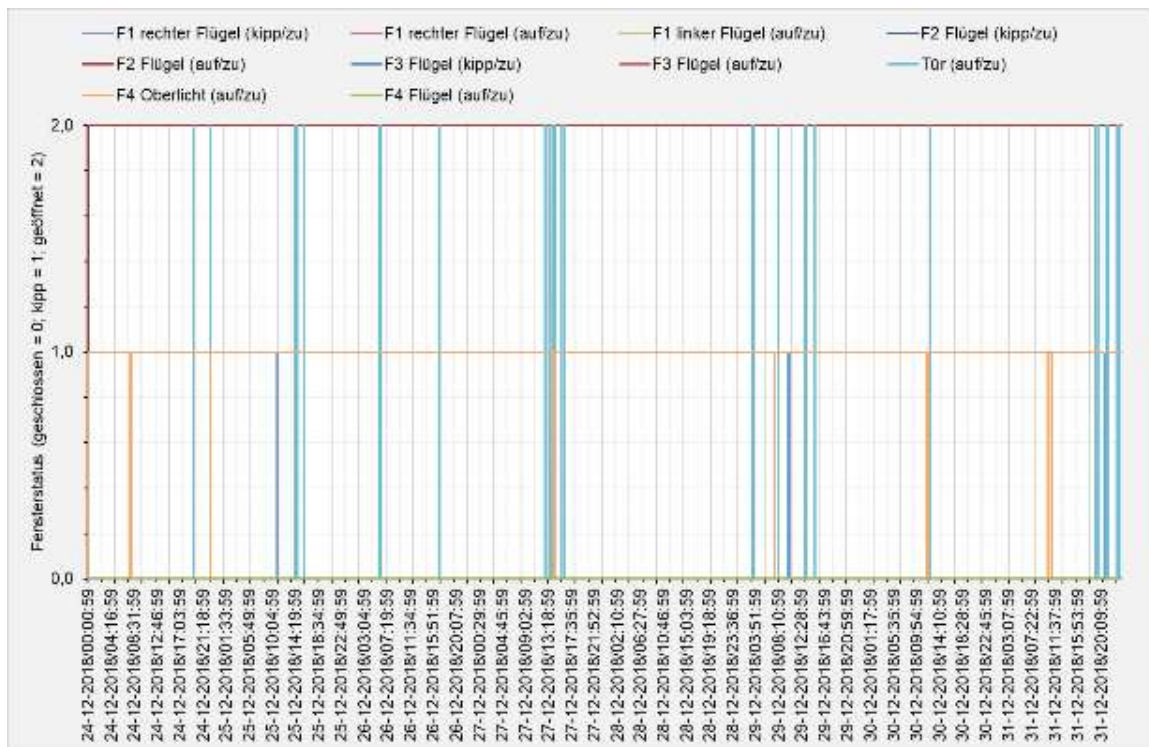


Abbildung 17: Fensterstatus Erdgeschoss KW52/2018 – Hoher Weg 18

Insgesamt zeigt der Monitoringteil von AP 1.2, dass die messtechnische Begleitung im Projekt nicht als bloße Datensammlung angelegt war, sondern als systematische Grundlage für Planung, Bewertung und spätere Validierung. Die Kombination aus Tabelle 2, dem gestuften Messkonzept in Abbildung 2, der konkreten Dokumentation von Energie- und Klimamonitoring in Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 7 sowie der Dateninfrastruktur und den Beispielauswertungen in Abbildung 8 bis Abbildung 17 belegt, dass eine belastbare empirische Grundlage für die weiteren energetischen und bauphysikalischen Untersuchungen geschaffen wurde.

Parallel zum Monitoring wurden vertiefte Bauwerksuntersuchungen durchgeführt, um die konstruktiven und materialtechnischen Randbedingungen der ausgewählten Gebäude belastbar zu erfassen. Dies war erforderlich, weil die energetische Bewertung des Bestands nicht allein aus Verbrauchs- und Klimadaten abgeleitet werden kann, sondern eine genaue Kenntnis von Wandaufbauten, Decken, Dachkonstruktionen, Öffnungen und Materialeigenschaften voraussetzt. Die für Monitoring und Bestandsuntersuchungen ausgewählten Gebäude sind wiederum in Tabelle 2 verankert; damit wird deutlich, dass Messung und Bauteilanalyse methodisch aufeinander bezogen waren.

Als allgemeine Ausgangslage wurde festgestellt, dass alle untersuchten Gebäude teilunterkellert sind, die Kellerwände überwiegend aus Bruchsteinmauerwerk bestehen und häufig eine Vorsatzschale aus Sandstein aufweisen. Zudem wurden unterschiedliche Fensterqualitäten vorgefunden, darunter Einfachfenster mit Einscheibenverglasung, Verbundfenster, Fenster mit Standardisolierverglasung sowie Fenster mit Zweifach-Wärmedämmverglasung. Diese Heterogenität ist bauphysikalisch und energetisch hoch relevant, da sie zeigt, dass der Bestand nicht über einheitliche Hüllqualitäten verfügt, sondern teils erhebliche Unterschiede im Transmissionsverhalten und in der Luftdichtheit aufweist. Bereits aus diesem Befund ergibt sich, dass pauschale Sanierungsaussagen für das Quartier nicht ausreichen, sondern differenzierte Bewertungen erforderlich sind.

Für die Außenwände wurden zwei grundlegende Konstruktionsarten identifiziert: einschaliges und zweischaliges Ziegelmauerwerk. Das Mauerwerk besteht in beiden Fällen aus Vollziegeln im Normalformat, die Lager- und Stoßfugen sind mit Kalkmörtel ausgeführt. Der Innenputz besteht

überwiegend aus Gipsputz, lokal wurden aber auch Altputze aus Kalk oder Zement festgestellt. Bei einschaligen Wandkonstruktionen liegt außen ein Kalkzementputz vor; bei zweischaligen Konstruktionen kommt ein steinsichtiger Klinker mit einem Luftspalt von etwa 85 mm hinzu. Für die spätere hygrothermische Bewertung ist diese Differenzierung zentral, weil sie das Feuchte- und Temperaturverhalten der Außenwand unmittelbar beeinflusst und damit die Eignung möglicher Innendämmlösungen bestimmt.

Die Untersuchung der Öffnungsdetails zeigte zudem, dass Fenster- und Türstürze nicht einheitlich ausgebildet sind. Es wurden Holz-, Beton- und Stahlstürze vorgefunden und dokumentiert. Solche Befunde sind für die energetische und bauphysikalische Bewertung deshalb wesentlich, weil Sturzbereiche häufig konstruktive Schwachstellen und potenzielle Wärmebrücken darstellen. Ihre Kenntnis ist damit nicht nur für die Beschreibung des Bestands, sondern auch für die Entwicklung schadensfreier Sanierungsdetails erforderlich.

Auch die Deckenaufbauten wurden differenziert untersucht. Die Decken über Erd- und Obergeschoss wurden als Holzbalkendecken identifiziert. Abbildung 18 macht die unterschiedlichen Luftschichtausbildungen deutlich, während Abbildung 19 die Konstruktionslogik der oberen Geschossdecke veranschaulicht. Die Decken sind bodenseitig mit Holzplatten belegt und deckenseitig mit Putzträger und Putzschichten versehen. Für die bauphysikalische Bewertung ist dies insofern bedeutsam, als Holzbalkendecken hinsichtlich Luftdichtheit, Wärmeleitung und Feuchtetransport anders reagieren als massive Deckenkonstruktionen.



Abbildung 18: EG Luftschicht 200 mm – OG Luftschicht 500 mm

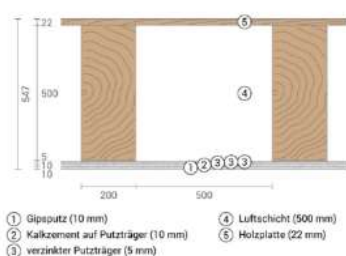
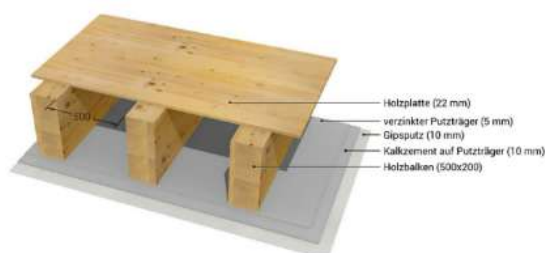


Abbildung 19: Exemplarischer Aufbau Decke Obergeschoss/Dachgeschoss

Im Bereich der Teilunterkellerung wurde die Decke zwischen Keller und Erdgeschoss als Kappendecke identifiziert. Auch wenn Einzelmaße nur näherungsweise erfassbar sind, ist die Dokumentation für die spätere Sanierungskonzeption wichtig, weil gerade der Übergang zwischen unbeheiztem Keller und beheiztem Erdgeschoss eine energetisch relevante Schnittstelle darstellt. Die konstruktive Ausbildung dieser Ebene wirkt sich sowohl auf Wärmeverluste als auch auf mögliche Maßnahmen zur thermischen Trennung aus.

Der Dachaufbau erwies sich bei den untersuchten Objekten grundsätzlich als gleichartig. Abbildung 20 und Abbildung 21 dokumentieren die wesentlichen Merkmale. Zugleich wurde festgestellt, dass Mieter teilweise bereits versucht hatten, Zwischensparrendämmungen einzubringen. Dieser Befund ist für die Projektbewertung doppelt relevant: Zum einen zeigt er ein vorhandenes Komfort- und Effizienzbedürfnis im Bestand, zum anderen verweist er auf bauphysikalische Risiken informeller oder uneinheitlicher Nachrüstungen im Dachbereich. Für die spätere Entwicklung standardisierter und denkmalverträglicher Sanierungsansätze war die genaue Aufnahme des Dachaufbaus daher unverzichtbar.

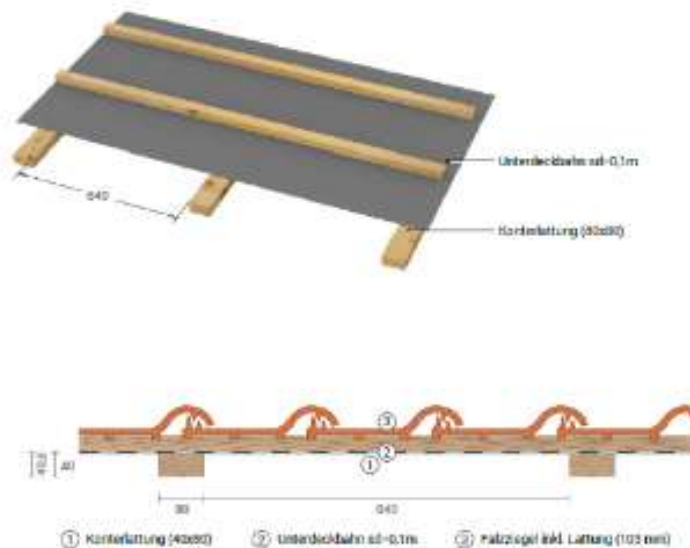


Abbildung 20: Dachaufbau



Abbildung 21: Dachaufbau mit Unterspannbahn (links) – Fenster DG (rechts)

Bei den Innenwänden wurde zwischen originalem Bestand und später eingefügten Trennwänden unterschieden. Abbildung 22 zeigt die originalen Innenwände aus Vollziegelmauerwerk mit Putzlagen unterschiedlicher Art und Dicke. Abbildung 23 dokumentiert demgegenüber Trockenbauwände, die bei Grundrissänderungen im Rahmen späterer Sanierungen eingesetzt wurden. Für die Gebäudesimulation und die hygrothermische Betrachtung ist diese Unterscheidung wesentlich, weil innere Speichermassen, Wärmeleitung und Feuchteverhalten zwischen massiven und leichten Innenwänden deutlich variieren.

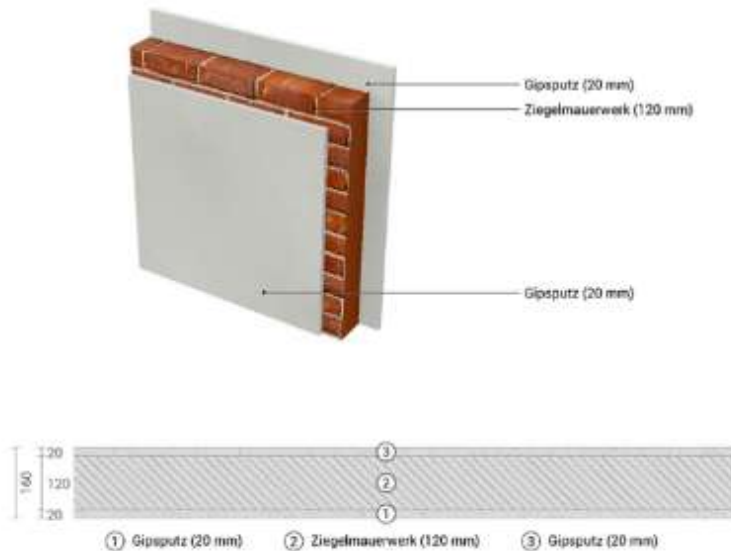


Abbildung 22: Innenwand aus Ziegelmauerwerk mit einer Stärke von 120 mm (exemplarisch)

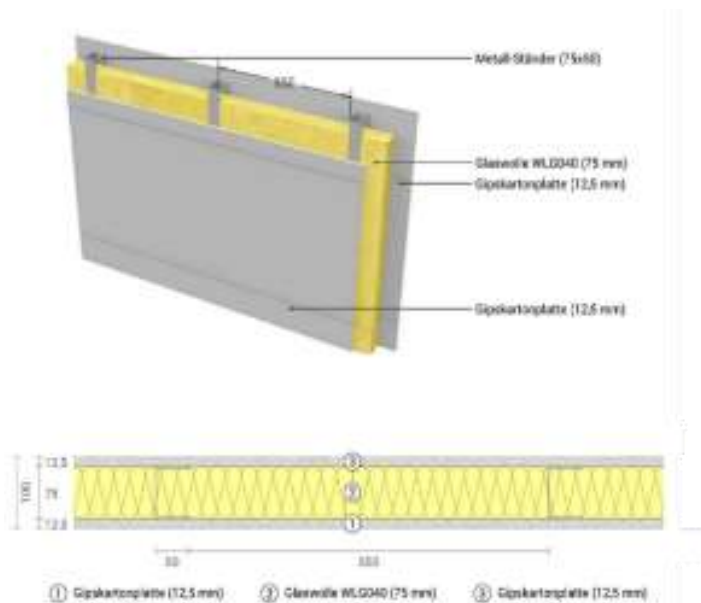


Abbildung 23: Trockenbauwand nach Sanierung durch Margarethe Krupp-Stiftung

Über die rein konstruktive Beschreibung hinaus wurden auch Kenngrößen zur „Güte“ der Gebäudehülle ermittelt. Mit dem Blower-Door-Test wurden Luftwechselraten bestimmt, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind. Die im Bericht aufgeführten Werte reichen von etwa 1,62 1/h bis 4,75 1/h. Dies zeigt, dass die Luftdichtheit innerhalb des Bestands deutlich variiert. Für die energetische Bewertung ist diese Feststellung wesentlich, da Luftwechselraten sowohl den Heizenergiebedarf als auch Komfort- und Feuchterisiken beeinflussen und deshalb als Eingangsgröße für die weiteren Berechnungen und Simulationen benötigt werden.

Ergänzend wurde am Objekt Sonnenblick 6 die kapillare Wasseraufnahme in situ mit dem Karsten-Röhrchen-Verfahren untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Spannweite der Werte – von 0,2 l/m²√h an der Fassadenoberfläche bis 12 l/m²√h im Fugenmörtel des Sockelbereichs – macht deutlich, dass nicht nur die Baustoffe selbst, sondern insbesondere Fugen- und Sockelbereiche hinsichtlich Feuchteaufnahme unterschiedlich reagieren.

Tabelle 3: Luftwechselrat n₅₀ (1/h)

Objekt	Lage	Art des Objektes	Geschosshöhe (m)	Luftwechselrate n ₅₀ (1/h)
Laubenweg 42	EG links	Wohnung	2,65	2,55
Laubenweg 42	OG rechts	Wohnung	2,65	4,75
Laubenweg 42	OG links	Wohnung	2,65	4,40
Laubenweg 42	DG	Wohnung	2,65	3,23
Waldlehne 88	EG links	Wohnung	2,65	1,65
Objekt	Lage	Art des Objektes	Geschosshöhe (m)	Luftwechselrate n ₅₀ (1/h)
Waldlehne 88	EG rechts	Wohnung	2,65	1,62
Waldlehne 88	OG rechts	Wohnung	2,65	1,65
Waldlehne 88	DG	Wohnung	2,65	2,52
Sonnenblick 6	EG	Wohnung	2,65	4,12

Tabelle 4: Wasseraufnahmekoeffizient nach Karsten

Probenbezeichnung	A _w Wasseraufnahmekoeffizient nach Karsten (l/m ² √h)
Verblendmauerwerk Sockel (außen)	1,4
Oberfläche Fassade	0,2
Fugenmörtel Sockel Außenwand	12
Keller Putz mit Anstrich	0,20
Keller Putz ohne Anstrich	1,80

Zur weitergehenden materialtechnischen Charakterisierung wurden Baustoffproben entnommen und im Labor untersucht. Erfasst wurden unter anderem offene Porosität, Wasseraufnahme, Wasseraufnahmekoeffizient, Porenverteilung, Wärmeleitfähigkeit sowie Rein- und Rohdichte für Ziegel, Klinker, Mörtel, Putze und weitere Baustoffe.

Insgesamt zeigt der zweite Teil von AP 1.2, dass die Bauwerksuntersuchungen weit über eine reine Bestandsbeschreibung hinausgehen. Es wurde eine Datengrundlage geschaffen, die sowohl konstruktiv als auch stofflich hinreichend tief ist, um die folgenden Energiebedarfsberechnungen und hygrothermischen Simulationen fachlich belastbar zu untermauern. AP 1.2 übernimmt damit im Gesamtzusammenhang von Teilprojekt 1 die Funktion einer empirisch-konstruktiven Fundierung: Das Monitoring liefert reale Zustands- und Betriebsdaten, die Bauwerksuntersuchungen die konstruktive und materialtechnische Einordnung.

Aufbauend auf den in AP 1.2 gewonnenen Erkenntnissen aus Monitoring, Bauwerksuntersuchungen und materialtechnischer Charakterisierung wurde in AP 1.3 der Energiebedarf ausgewählter Bestandsgebäude rechnerisch bestimmt. Ziel dieses Arbeitspakets war es, die im Quartier identifizierten typischen Gebäude in energetischer Hinsicht vergleichend zu bewerten, die Auswirkungen unterschiedlicher Bauweisen und Ausrichtungen bei ähnlicher Gebäudekubatur sichtbar zu machen und daraus eine erste belastbare Entscheidungsgrundlage für die weiteren bauphysikalischen und anlagentechnischen Untersuchungen abzuleiten. Die Energiebedarfsberechnungen erfolgten nach den Vorgaben der zum Bearbeitungszeitpunkt geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV). Damit wurde bewusst ein normiertes Vergleichsverfahren gewählt, auch wenn für

Baudenkmäler und besonders erhaltenswerte Bausubstanz unter bestimmten Voraussetzungen Abweichungen zulässig wären. Im Projektkontext war dies sinnvoll, da die Berechnungen nicht der formalen Nachweisführung für eine konkrete Fördermaßnahme dienten, sondern der systematischen vergleichenden Einordnung typischer Bestandskonstellationen.

Die Aussagekraft dieser Berechnungen ist methodisch einzuordnen. Zum einen lagen für die Nutzungszeit vor Beginn des Vorhabens beziehungsweise vor Installation des Monitorings keine belastbaren objektscharfen Verbrauchsdaten vor, sodass eine klassische Kalibrierung, wie sie etwa im Rahmen von Energieberatungen oder der Nachweisführung für umfassende Sanierungen erforderlich wäre, nicht möglich war. Zum anderen wurden im Projekt keine Standardanlagen untersucht, die sich vollständig und ohne Vereinfachungen in konventionellen Berechnungsprogrammen nach Norm abbilden lassen. Die Energiebedarfsberechnungen sind daher vor allem als Vergleichswerte innerhalb des Vorhabens zu verstehen. Ihre Stärke liegt weniger in der präzisen Vorhersage des später zu erwartenden Realverbrauchs als vielmehr in der strukturierten Eingrenzung von energetischen Zusammenhängen, typischen Verlustpfaden und Sanierungseffekten im historischen Bestand.

Als Grundlage der Berechnungen dienten, die in AP 1.2 vertieft untersuchten und intensiv überwachten Gebäude, die in Tabelle 5 zusammengefasst sind. Dort wird deutlich, dass mit den Objekten eine Auswahl getroffen wurde, die unterschiedliche Bauperioden, Außenwandkonstruktionen, Fassadenausbildungen, Fenstertypen und Ausrichtungen umfasst. Gleichzeitig weisen die Gebäude in wesentlichen Grundmerkmalen eine ausreichende Vergleichbarkeit auf: Sie sind zweigeschossig, einseitig angebaut und besitzen im unsanierten Zustand jeweils ein Mansardenzimmer im ansonsten unbeheizten Dachgeschoss. Damit wurde eine Untersuchungsgruppe gewählt, die trotz ihrer Heterogenität in zentralen energetischen Parametern typologische Vergleiche zulässt.

Tabelle 5: Objekte im Intensivmonitoring

Adresse	Typ	Baujahr	Außenmauerwerk	Fassade	Fenster	Wärmeversorgung
Hoher Weg 18	EFH	1912 (Bauperiode IV)	2-schalig	Klinker	Isolierglas	Gas
Laubenweg 22 (1.OG)	ZFH	1913 (Bauperiode IV)	1-schalig	Putz	Isolierglas	Gas
Metzendorfstr. 38C	EFH	1913 (Bauperiode IV)	1-schalig	Putz	Doppelglas	Gas
Sonnenblick 6 (EG)	ZFH	1915 (Bauperiode VI)	1-schalig	Putz	Isolierglas	Gas
Stensstr. 17	EFH	1910/11 (Bauperiode II)	1-schalig	Putz	Doppelglas	Gas

Die räumliche und typologische Einordnung dieser Gebäude wird anhand der Objektabbildungen nachvollziehbar gemacht. Abbildung 24 bis Abbildung 28 dokumentieren jeweils Katasterplan und fotografische Einordnung der betrachteten Gebäude. Die Abbildungen verdeutlichen die Lage im Quartier, die Anbausituation und die bauliche Erscheinung der ausgewählten Objekte und machen damit nachvollziehbar, dass die Berechnungen nicht an abstrakten Modellgebäuden, sondern an realen und im Bestand verankerten Typen des Quartiers durchgeführt wurden. Gerade im Kontext eines denkmalgeschützten Siedlungsbestands ist diese Rückbindung an die reale Gebäudestruktur wesentlich.



This map shows the 2400 block of North Broadway Avenue. The street is labeled '2400 NORTH BROADWAY AVENUE' at the top. The map includes a 'Click' button and a 'X' mark. The lot numbers are 241, 242, 243, 244, and 245. The building footprints are shown with their respective lot numbers and street addresses. The map also shows the intersection with 37th Street at the bottom.



Seite 31 von 246

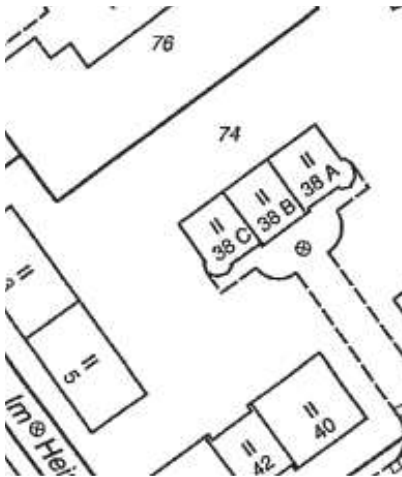


Abbildung 27 - Metzendorfstraße 38, Katasterplan und Foto (Gebäude C links)



Abbildung 28 - Stensstraße 17, Katasterplan und Foto (Gebäude rechts)

Im Zuge der Bearbeitung zeigte sich allerdings auch eine methodische Grenze des EnEV-Verfahrens. Da Energiebedarfsberechnungen nach EnEV grundsätzlich auf gesamte Gebäude und nicht auf einzelne Wohnungen bezogen sind, konnten die im Monitoring erfassten Wohnungen in Mehrfamilienhäusern nicht ohne Weiteres als eigenständige Berechnungsobjekte behandelt werden. Dies betrifft insbesondere die Objekte Laubenweg 22 und Sonnenblick 6. Diese Gebäude konnten für die Berechnungen nur unter der Annahme herangezogen werden, dass aus den Bauwerksuntersuchungen auf den Wärmeschutz der Hüllfläche und auf die Anlagentechnik in den jeweils nicht unmittelbar untersuchten Geschossen geschlossen werden kann. Für Laubenweg 22 wurde zusätzlich angenommen, dass das Gebäude augenscheinlich vollständig saniert wurde, im Erdgeschoss also ein Zustand vergleichbarer thermischer Qualität vorliegt, das ehemalige Mansardenzimmer im Dachgeschoss jedoch unbeheizt bleibt und weder Dach noch oberste Geschossdecke im Zuge früherer Maßnahmen gedämmt wurden. Diese Annahmen zeigen, dass das Arbeitspaket nicht auf schematische Normanwendung reduziert war, sondern die Grenzen der Modellbildung im historischen und bewohnten Bestand reflektiert und transparent gemacht wurden.

Für die ersten Berechnungen wurden die Informationen aus den Bauwerksuntersuchungen mit den Daten des Intensivmonitorings zusammengeführt und mit der Software ZUB Helena ausgewertet. Die Modellbildung folgte dabei der Logik der EnEV, nach der bei aneinandergereihter Bebauung diejenigen Wände unberücksichtigt bleiben, die an angrenzende Gebäude mit vergleichbarer Nutzung und einer Innentemperatur von mindestens 19 °C grenzen. Mögliche Tem-

peratordifferenzen an den Grenzflächen bleiben dann unberücksichtigt, wenn nur eines von zwei aneinandergebauten Gebäuden ein zuvor unbeheiztes Dachgeschoss ausbaut. Auch dies verdeutlicht, dass die EnEV-Berechnung im Projekt zwar als einheitlicher Bewertungsrahmen genutzt wurde, die physikalische Realität des Bestands jedoch an mehreren Stellen komplexer ist als das standardisierte Verfahren abbilden kann.

Die Grundannahme für das typische Berechnungsmodell ist in Abbildung 29 dargestellt. Zugrunde gelegt wurde eine Beheizung des Erdgeschosses und des 1. Obergeschosses sowie eine daraus resultierende indirekte Beheizung des Dachgeschosses. Diese Abbildung ist für die Interpretation der Ergebnisse zentral, da sie den thermisch relevanten Gebäudeausschnitt definiert, auf den sich die nachfolgenden Kennwerte beziehen. Die Darstellung macht zugleich deutlich, dass bereits die Festlegung des beheizten Volumens im Bestand ein wesentliches Ergebnis der vorangegangenen Bestandsuntersuchungen ist und nicht schematisch erfolgen konnte.

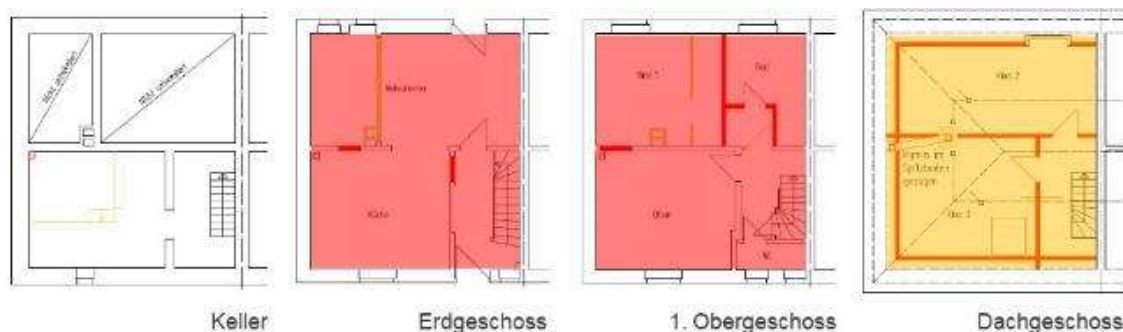


Abbildung 29: Beheiztes Gebäudevolumen

Auf dieser Basis wurde der spezifische Transmissionswärmeverlust H_T als mittlerer Wert über die gesamte wärmeübertragende Umfassungsfläche ermittelt. Für den unsanierten Zustand des typischen Gebäudes wurde ein Wert von 1,302 W/m²K ausgewiesen. Die Verteilung der Wärmeverluste über die Gebäudehülle wird in Abbildung 30 veranschaulicht. Der größte Anteil der Verluste entfällt auf die Außenwände. Diese Aussage ist für die weitere Vorgehensweise von besonderer Bedeutung, weil sie die hohe Relevanz der Wandflächen für die energetische Verbesserung des Bestands bestätigt und damit die spätere vertiefte Untersuchung innenseitiger Dämmmaßnahmen fachlich stützt. Zugleich zeigt die Abbildung, dass die energetische Bewertung nicht nur über Gesamtkennwerte erfolgt, sondern differenziert nach Bauteilgruppen betrachtet wurde.

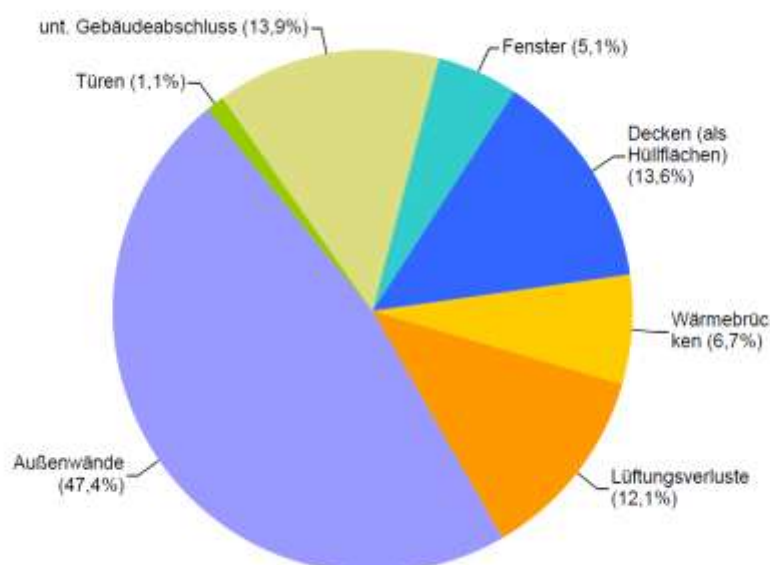


Abbildung 30: Anteilige Wärmeverluste über die Gebäudehülle

Eine unmittelbare Kalibrierung der Berechnungsergebnisse anhand gemessener Verbräuche war bei keinem der fünf Objekte möglich. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass dies die Sensorik zur Temperaturerfassung erst im Zuge der Bestandsuntersuchungen und Sanierungsarbeiten eingebaut werden konnte. Darüber hinaus konnten vertiefte Bestandsuntersuchungen vielfach nur im Zuge anstehender Sanierungsmaßnahmen vorgenommen werden, sodass der Zustand, in dem reale Verbrauchsdaten erhoben werden konnten, nicht mehr vollständig dem unsanierten Referenzzustand entsprach. Diese methodische Problematik wird durch Abbildung 31 anschaulich gemacht: Durch Fensteraustausch, Dachausbau und die Einbeziehung vormals unbeheizter Räume verändert sich das thermisch wirksame Volumen des Gebäudes, sodass zwischen Bestandsmodell und Messzustand ein zusätzlicher Modellierungsschritt erforderlich wird.

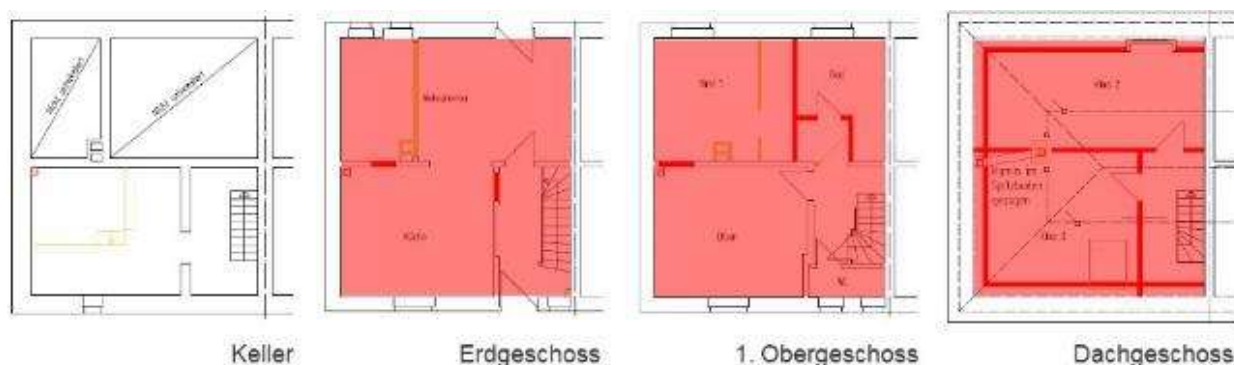


Abbildung 31: Beheiztes Gebäudevolumen nach Sanierung

Gerade aus diesem Grund kommt dem Vergleich von Sanierungsvarianten innerhalb des normativen Berechnungsrahmens eine besondere Bedeutung zu. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Dort werden der Ist-Zustand, eine „MKS-Standardsanierung“ mit Dachausbau und Fensteraustausch, eine Variante mit zusätzlicher Dämmung des Bodens zu Keller beziehungsweise unbeheizten Bereichen, eine weitergehende Variante mit zusätzlicher Dämmung der Außenwände sowie eine Kombination mit Fußbodenheizung und Wärmepumpe gegenübergestellt. Aus der Tabelle wird deutlich, dass bereits die Standardmaßnahmen eine deutliche Verbesserung der thermischen Hülle bewirken: Der spezifische Transmissionswärmeverlust sinkt von $1,302 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $0,827 \text{ W/m}^2\text{K}$, der spezifische Heizwärmebedarf von $286,8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ auf $243,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Eine zusätzliche Dämmung der Trennflächen zu unbeheizten Bereichen reduziert die Werte weiter auf $0,714 \text{ W/m}^2\text{K}$ beziehungsweise $212,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Die beträchtlichste Verbesserung zeigt sich bei zusätzlicher Dämmung der Außenwände: Hier sinkt der spezifische Transmissionswärmeverlust auf $0,506 \text{ W/m}^2\text{K}$ und der spezifische Heizwärmebedarf auf $155,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Bemerkenswert ist, dass die zusätzliche Einführung von Fußbodenheizung und Wärmepumpe in dieser Tabelle den Heizwärmebedarf nicht weiter verändert, was sachlogisch damit zusammenhängt, dass es sich hierbei primär um eine Verbesserung der Anlagentechnik und nicht der Hüllqualität handelt. Die Tabelle zeigt damit sehr klar die energetische Wirkung der Hüllmaßnahmen und bestätigt zugleich die Trennung von Hüll- und Anlageneffekten im Berechnungsansatz.

Es können somit folgende Aussagen abgeleitet werden: Bereits die Dämmung des Daches im Zuge des Dachausbaus verbessert die thermische Qualität der Gebäudehülle deutlich; eine zusätzliche Trennung und Dämmung unbeheizter Bereiche sowie eine ergänzende Dämmung der Außenwände führen insgesamt zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs um rund 40 %. Diese Aussage stellt eine wesentliche Brücke zu den nachfolgenden Arbeitspaketen dar, weil sie zeigt, welche Größenordnung an energetischer Verbesserung durch bauphysikalisch und denkmal-ver-

träglich entwickelte Hüllmaßnahmen prinzipiell erreichbar ist. Zugleich liefert sie die Grundlage für die vertiefte hygrothermische Untersuchung dieser Maßnahmen in AP 1.4.

Tabelle 6: Vergleich Sanierungsvarianten

Ergebnisse	Ist-Wert	Variante 1 MKS "Standard-sanierung" (Dachausbau + Fenster austauschen)	Variante 2 MKS-Standard mit Dämmung Boden und zu Keller	Variante 3 MKS-Standard mit Dämmung Boden, Außenwänden und zu unbeheizten Bereichen	Variante 4 MKS-Standard mit Dämmung, Fußbodenheizung und Wärmepumpe
spez. Transmissionswärmeverlust [W/(m²K)]:	1,302	0,827	0,714	0,506	0,506
spez. Heizwärmebedarf [kWh/m²a]:	286,8	243,5	212,5	155,2	155,2

Über die eigentlichen Energiebedarfsberechnungen hinaus wurde in AP 1.3 auch das Thema Solarpotenzial und Solardachkataster bearbeitet. Das Photovoltaic Geographic Information System bildete den Ausgangspunkt für ein online verfügbares Solarkataster der Margarethenhöhe. Über den Energieatlas NRW können adressbezogen geeignete Dachflächen angezeigt werden. Ergänzend wurde auf das regionale Solardachkataster von *teraeder.solar* für den Regionalverband Ruhr zurückgegriffen, das für Gebäude in Essen die Eignung für Photovoltaik und Solarthermie ausweist. Zugleich wird die Aussagekraft dieser Werkzeuge kritisch eingeordnet: Dachaufbauten, Fenster, Vegetation und jahreszeitlich veränderliche Verschattungssituationen werden nur unvollständig oder nicht in der erforderlichen Tiefe berücksichtigt. Gerade für die Margarethenhöhe mit ihren charakteristischen Dachaufbauten und der relevanten Verschattung durch Baumbestand reicht eine pauschale katasterbasierte Bewertung daher nicht aus. Basierend auf dieser Tatsache folgte, dass für die Gesamtsiedlung zunächst nur eine tabellarische Übersicht erstellt wurde und eine weitergehende Simulation erst nach Festlegung der genauen technischen Eigenschaften der Solardachsteine sinnvoll war. Auch diese Untersuchungen waren im Gesamtzusammenhang wichtig, da gezeigt wurde, dass AP 1.3 nicht nur auf den Wärmebedarf der Gebäudehülle, sondern bereits auf das regenerative Potenzial der Dachflächen vorausblickt.

Insgesamt nimmt AP 1.3 damit eine zentrale Vermittlungsfunktion innerhalb von Teilprojekt 1 ein. Aufbauend auf den in AP 1.2 gewonnenen Bestands- und Messdaten wurden diejenigen Grundlagen geschaffen, die für die nachfolgenden Arbeitspakete unverzichtbar sind. Das Arbeitspaket zeigt, welche Bauteile energetisch besonders relevant sind, welche Wirkungen durch typische Sanierungskombinationen erreichbar erscheinen und wo die Grenzen normativer Vergleichsverfahren im historischen, bewohnten Bestand liegen.

Aufbauend auf den in AP 1.3 durchgeführten Energiebedarfsberechnungen wurde in AP 1.4 das Verhalten für die Siedlung typischer Gebäudehüllen thermisch-hygrisch untersucht. Während AP 1.3 vor allem die energetische Relevanz der Hüllflächen und die Wirkung typischer Sanierungskombinationen herausgearbeitet hatte, zielte AP 1.4 darauf ab, die bauphysikalische Eignung der vorgesehenen Innendämm Lösungen näher zu prüfen. Im Mittelpunkt stand damit nicht mehr die Frage, ob Hüllmaßnahmen energetisch wirksam sind, sondern unter welchen konstruktiven und materialtechnischen Randbedingungen sie im denkmalgeschützten Bestand schadensfrei umgesetzt werden können. Als Arbeitsziele werden im Bericht ausdrücklich die Modellbildung für Bestandsgebäude, die Definition von Anforderungen an Innendämmsysteme, die Untersuchung kritischer Anschlusspunkte sowie die Definition zulässiger Temperaturkurven benannt.

AP 1.4 übernimmt damit innerhalb von Teilprojekt 1 die Funktion, die in AP 1.3 energetisch als sinnvoll identifizierten Hüllmaßnahmen bauphysikalisch abzusichern.

Zunächst wurden Berechnungen hinsichtlich der Außenwände mit und ohne Innendämmputz mit dem Programm Cond 2.2 der TU Dresden durchgeführt. Dieses Werkzeug ist geeignet für Feuchteschutznachweise nach DIN 4108-3, für den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2, für normgerechte Nachweise moderner Innendämmsysteme sowie für die Konstruktionsoptimierung. Methodisch ist dieser Zwischenschritt wichtig: Bevor komplexere Gesamtgebäudemodelle weitergeführt werden, wird auf Bauteilebene geprüft, wie sich die relevanten Außenwandkonstruktionen unter der vorgesehenen innenseitigen Ertüchtigung verhalten und ob eine Vereinfach der Berechnung möglich ist. Dadurch wird bereits an dieser Stelle eine belastbare Grundlage für die spätere Auswahl geeigneter Dämmstärken, Konstruktionsvarianten und angewandte Berechnungsverfahren geschaffen.

Die Berechnungen wurden für die beiden im Bestand identifizierten wesentlichen Außenwandtypen durchgeführt, also für das einschalige Mauerwerk und das zweischalige Mauerwerk, jeweils sowohl im Bestandszustand als auch nach einer Sanierung mit 30 mm Aerogelhochleistungsdämmputz als Innendämmung. Die Ergebnisse der Temperatur- und Feuchteverläufe werden im Bericht in Abbildung 32 bis Abbildung 35 dokumentiert. Diese Vorgehensweise zeigt, dass AP 1.4 nicht pauschal eine einzelne Wandlösung bewertet, sondern die im Quartier tatsächlich vorkommenden Wandkonstruktionen differenziert untersucht und damit an die Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen aus AP 1.2 anschließt.

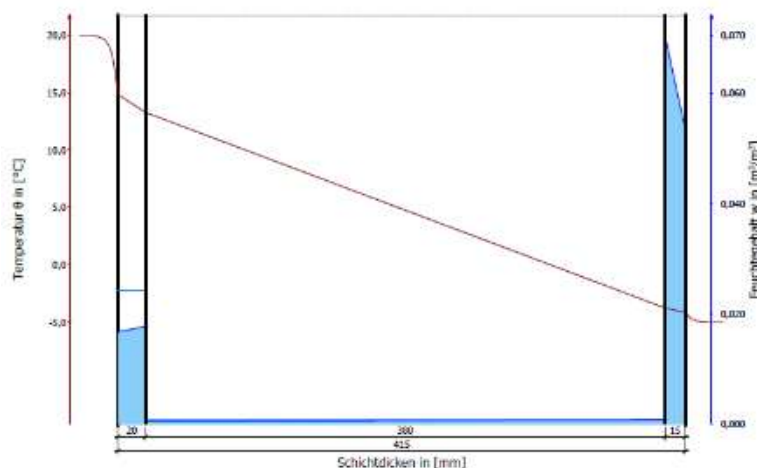


Abbildung 32: Temperatur- und Feuchteprofil der einschaligen Bestandsaußenwand

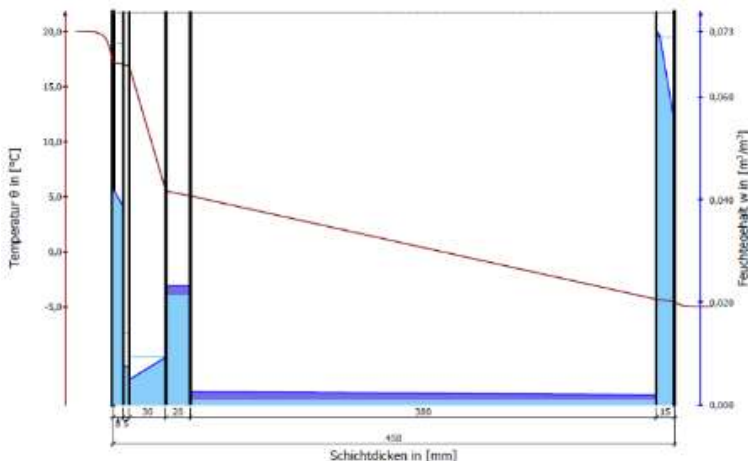


Abbildung 33: Temperatur- und Feuchteprofil der einschaligen Außenwand mit Innendämmputz

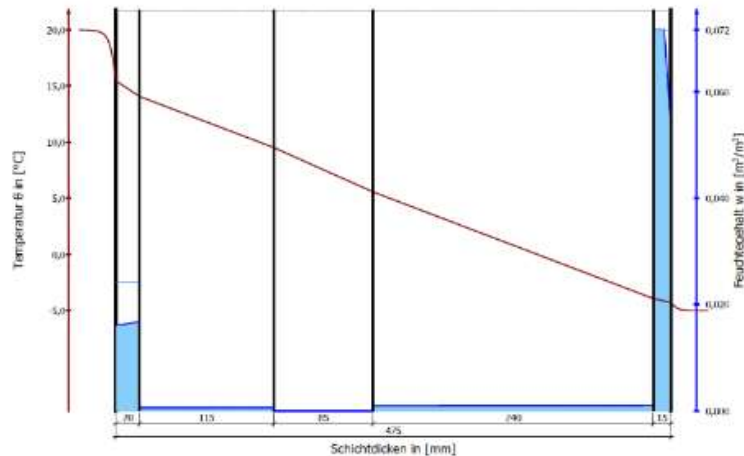


Abbildung 34: Temperatur- und Feuchteprofil der zweischaligen Bestandsaußenwand

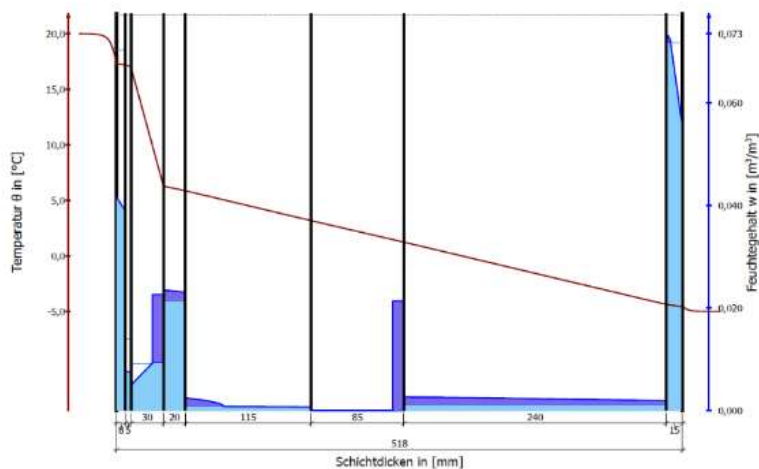


Abbildung 35: Temperatur- und Feuchteprofil der zweischaligen Außenwand mit Innendämmputz

Die vier Abbildungen zeigen, dass durch den Einbau des Aerogelinnendämmputzes in beiden untersuchten Wandtypen Kondensat entsteht, dieses jedoch nach Bewertung bauphysikalisch unbedenklich ist, da es während der sommerlichen Witterungsperiode wieder abtrocknet. Für das einschalige Mauerwerk wird in Abbildung 33 beschrieben, dass sich Tauwasser an der Grenze vom Wärmedämmputz zum Grundputz, im Grundputz selbst sowie im Ziegelmauerwerk bildet. Für das zweischalige Mauerwerk zeigt Abbildung 35 ein ähnliches Bild, allerdings mit einer zusätzlichen Kondensatbildung an der Grenze vom Luftraum zum Klinkermauerwerk sowie im Klinkermauerwerk selbst. Diese Differenzierung ist für die fachliche Bewertung zentral, da sie zeigt, dass der Einbau eines Innendämmsystems je nach Wandaufbau zu unterschiedlichen hygrothermischen Beanspruchungen führt und dass insbesondere zweischalige Konstruktionen wegen ihres konstruktiven Aufbaus differenzierter zu betrachten sind.

Die zusammenfassende quantitative Bewertung dieser Bauteilberechnungen ist in Tabelle 7 dargestellt. Tabelle 7 zeigt, dass sich mit dem Einbau des Hochleistungsdämmputzes der U-Wert in beiden Wandtypen nahezu halbiert: Beim einschaligen Mauerwerk sinkt der feuchteabhängige U-Wert von 0,826 W/(m²K) im Bestand auf 0,455 W/(m²K) bei 30 mm Innendämmung, beim zweischaligen Mauerwerk von 0,728 W/(m²K) auf 0,430 W/(m²K). Gleichzeitig steigen die Wärmedurchlasswiderstände R_{auf} auf 1,911 m²K/W beziehungsweise 2,036 m²K/W. Besonders wichtig ist, dass die in der Tabelle dokumentierten normativen Anforderungen nach DIN 4108-2 mit 30 mm Dämmstärke erfüllt werden, während sie im Bestand noch nicht eingehalten werden. Auch die

Mindestanforderung an den Temperaturfaktor $f_{RSI} \geq 0,7$ wird in allen betrachteten Fällen eingehalten beziehungsweise deutlich überschritten.

Darüber hinaus ist für die Beurteilung der hygrothermischen Sicherheit wesentlich, dass in Tabelle 7 auch die flächenbezogene Tauwassermasse und die sommerliche Trocknungszeit ausgewiesen sind. Für das einschalige Mauerwerk mit 30 mm Innendämmung wird eine Tauwassermasse von 0,598 kg/m² angegeben, für das zweischalige Mauerwerk 0,413 kg/m²; die Trocknungszeiten liegen bei 27 Tagen beziehungsweise 19,06 Tagen und damit unterhalb des im Bericht genannten Kriteriums von 90 Tagen. Entscheidend ist hier weniger die isolierte Existenz von Kondensat als dessen Fähigkeit zur sommerlichen Rücktrocknung. Hier liegt die fachliche Aussage dieses Arbeitspakets: Die Innendämmung wird nicht danach beurteilt, ob jegliche Tauwasserbildung ausgeschlossen ist, sondern danach, ob die auftretenden Feuchtemengen im System wieder schadlos austrocknen und die normativen Anforderungen eingehalten werden. Diese Unterscheidung ist für die Beurteilung historischer Außenwände von erheblicher Bedeutung. Die untersuchte Innendämmmaßnahme ist also nicht nur energetisch wirksam, sondern auch aus normativer Sicht grundsätzlich tragfähig ist.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse mit dem Programm Cond 2.2

	Einschaliges Mauerwerk		Zweischaliges Mauerwerk	
	Bestand	Dämmung 30 mm	Bestand	Dämmung 30 mm
U-Wert (feuchteabhängig) (W/(m ² K))	0,826	0,455	0,728	0,430
U-Wert (trocken) (W/(m ² K))	0,826	0,454	0,728	0,430
R (trocken) (m ² K/W)	0,920	1,911	1,083	2,036
Bemerkung	Kein Kondensat	Kondensat	Kein Kondensat	Kondensat
DIN 4108-2 Tab. 3 Zeile 1 R ≥ 1,2 m ² K/W	Anforderungen nicht erfüllt	Anforderungen erfüllt	Anforderungen nicht erfüllt	Anforderungen erfüllt
DIN 4108-2 Kontrolle min. $f_{RSI} \geq 0,7$	0,83	0,90	0,85	0,90
DIN 4108-3 wasseraufnahmefähig M _C ≤ 1,0 kg/m ² nicht wasseraufnahmefähig M _C ≤ 0,5 kg/m ²	Anforderungen erfüllt	0,598	Anforderungen erfüllt	Nicht wasseraufnahmefähig 0,413
Trocknungszeit Sommer t _{ev} < 90 d	Anforderungen erfüllt	27 d	Anforderungen erfüllt	19,06

Aufbauend auf dieser Grunduntersuchung wurden in einem weiteren Schritt unterschiedliche Dämmstärken betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Verglichen werden dabei für beide Wandtypen Varianten mit 30 mm und 80 mm Dämmstoffdicke. Tabelle 8 zeigt, dass sich der U-Wert durch die Erhöhung der Dämmstoffdicke von 30 mm auf 80 mm nochmals deutlich reduziert: Beim einschaligen Mauerwerk sinkt der feuchteabhängige U-Wert von 0,455 W/(m²K) auf 0,259 W/(m²K), beim zweischaligen Mauerwerk von 0,430 W/(m²K) auf 0,248 W/(m²K). Damit wird rechnerisch zwar eine weitere erhebliche Verbesserung des Wärmeschutzes erreicht, zugleich verschärfen sich jedoch die hygrothermischen Randbedingungen.

Gerade diese Gegenüberstellung macht den Erkenntnisgewinn von AP 1.4 aus. Bei einer Erhöhung der Dämmstoffdicke von 30 mm auf 80 mm wird deutlich, dass die flächenbezogene Tauwassermasse beim zweischaligen Mauerwerk den erlaubten Wert von 0,5 kg/m² für nicht wasseraufnahmefähige Schichten überschreitet. Für die 80-mm-Variante des zweischaligen Mauerwerks wird in Tabelle 10 „Variation der Dämmstärken“ ein Wert von 0,674 kg/m² ausgewiesen. Darüber hinaus ergaben weiterführende Berechnungen, dass dieser Grenzwert beim untersuchten zweischaligen Mauerwerk bereits ab einer Dämmstoffstärke von 40 mm überschritten wird.

Die energetisch verlockende Erhöhung der Dämmstärke ist damit bauphysikalisch nicht beliebig fortsetzbar..

Tabelle 8: Variation der Dämmstärken

	Einschaliges Mauerwerk		Zweischaliges Mauerwerk	
	Dämmung 30 mm	Dämmung 80 mm	Dämmung 30 mm	Dämmung 80 mm
U-Wert (feuchteabhängig) (W/(m²K))	0,455	0,259	0,430	0,248
U-Wert (trocken) (W/(m²K))	0,454	0,259	0,430	0,248
R (trocken) (m²K/W)	1,911	3,577	2,036	3,740
Bemerkung	Kondensat	Kondensat	Kein Kondensat	Kondensat
DIN 4108-2 Tab. 3 Zeile 1 $R \geq 1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$	Anforderungen erfüllt	Anforderungen erfüllt	Anforderungen erfüllt	Anforderungen erfüllt
DIN 4108-2 Kontrolle min. $f_{\text{RSI}} \geq 0,7$	0,90	0,94	0,90	0,94
DIN 4108-3 wasseraufnahmefähig $M_c \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ nicht wasseraufnahmefähig $M_c \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	0,598	0,792	0,413	Nicht wasseraufnahmefähig 0,674
Trocknungszeit Sommer $t_{\text{ev}} < 90 \text{ d}$	27 d	56,01	19,06	47,30

Für das einschalige Mauerwerk zeigt Tabelle 8 ebenfalls eine Zunahme der Tauwassermasse von 0,598 kg/m² bei 30 mm auf 0,792 kg/m² bei 80 mm, zugleich bleibt jedoch die sommerliche Trocknungszeit mit 56,01 Tagen noch unterhalb der genannten Grenze. Dies macht deutlich, dass die Bewertung nicht allein über einen Kennwert erfolgen kann, sondern immer im Zusammenwirken von U-Wert, Kondensatmenge, Wasseraufnahmefähigkeit und Rücktrocknung zu erfolgen hat. Das Arbeitspaket leitet aus den Simulationsresultaten keine pauschale Empfehlung „mehr Dämmung = besser“ ab, sondern arbeitet eine konstruktionsspezifische, bauphysikalisch begründete Bemessungslogik heraus.

Im Ergebnis kann abgeleitet werden, dass der untersuchte Aerogelhochleistungsdämmputz in einer Stärke von 30 mm für die im Quartier relevanten Außenwandkonstruktionen eine tragfähige Lösung darstellt. Das Arbeitspaket liefert damit nicht nur einen Nachweis der grundsätzlichen Eignung des Systems, sondern auch eine fachlich belastbare Begrenzung zulässiger Dämmstoffdicken, insbesondere für das zweischalige Mauerwerk. Zugleich werden aus den Ergebnissen Anforderungen an die weitere Planung abgeleitet, etwa im Hinblick auf konstruktiv kritische Bereiche und auf die Einhaltung zulässiger Temperatur- und Feuchteverläufe.

AP 1.5 hatte die Aufgabe, das thermische Verhalten ausgewählter Bestandsgebäude der Margarethenhöhe mit dynamischen Simulationswerkzeugen so abzubilden, dass sowohl die Auswirkungen denkmalverträglicher Hüllmaßnahmen als auch die Anforderungen an Wärmeübergabe, Wärmeerzeugung und Systembetrieb belastbar beurteilt werden konnten. Während in AP 1.3 zunächst der Energiebedarf im Bestand und in typisierten Sanierungszuständen bilanziell eingeordnet und in AP 1.4 die bauphysikalische Eignung ausgewählter Hüllmaßnahmen auf Bauteilebene untersucht wurde, verfolgte AP 1.5 einen integrativen Ansatz auf Gesamtgebäudeebene. Im Mittelpunkt standen damit nicht mehr einzelne Bauteile, sondern das Zusammenwirken von Gebäudegeometrie, Baukonstruktion, Nutzerprofilen, Lüftung, solaren Einträgen, Wärmeübergabesystemen und Wärmeerzeugung. Damit bildet AP 1.5 das zentrale Bindeglied zwischen bauphysikalischer Einzelbewertung und der in AP 1.6 abzuleitenden Sanierungsempfehlung.

Die Modellbildung basiert auf einer vergleichsweise hohen geometrischen und konstruktiven Detailtiefe. Als Grundlage dienen die historischen Planunterlagen, die in Abbildung 36 exemplarisch gezeigt werden.

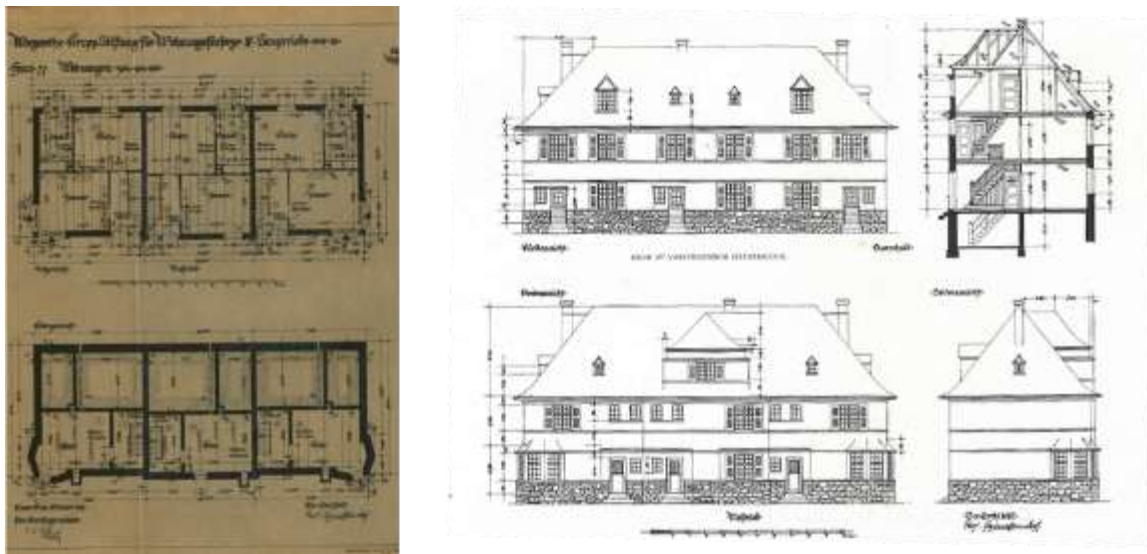


Abbildung 36: Metzendorfstraße 38 ABC Originalzeichnung von 1912

Die zeichnerische Überführung in das Simulationsmodell wird über Abbildung 37 und Abbildung 38 nachvollziehbar gemacht.

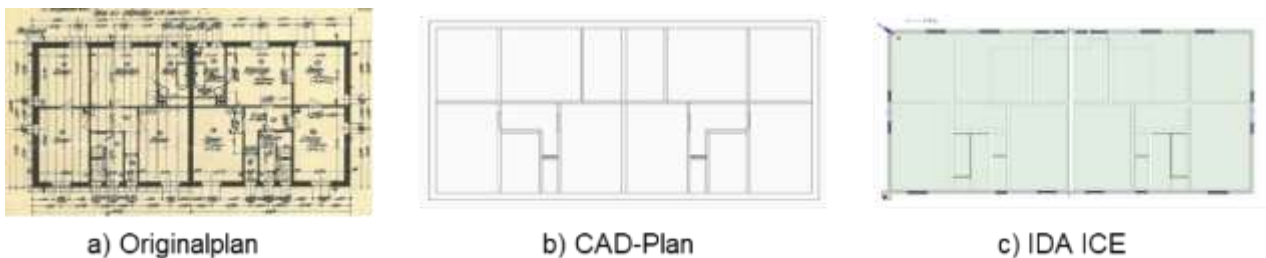


Abbildung 37: Grundriss des Erdgeschosses Sonnenblick 6 und 8

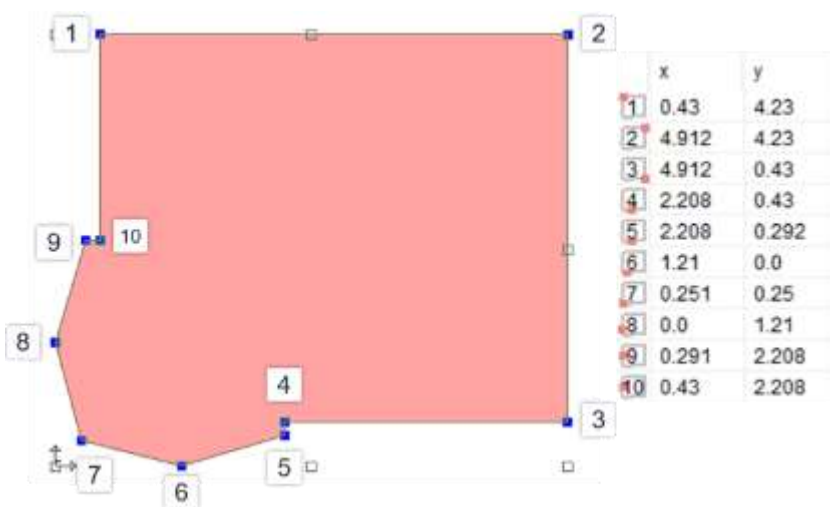


Abbildung 38: Grundrissgeometrie der Zone „Wohnzimmer“, Metzendorfstraße 38 C „Referenz Bestand 1995“

Ergänzend verdeutlichen Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45, dass die Simulation nicht auf vereinfachten Ersatzmodellen be-

ruhte, sondern auf einer sorgfältigen Übertragung realer Gebäudestrukturen in das Rechenmodell.

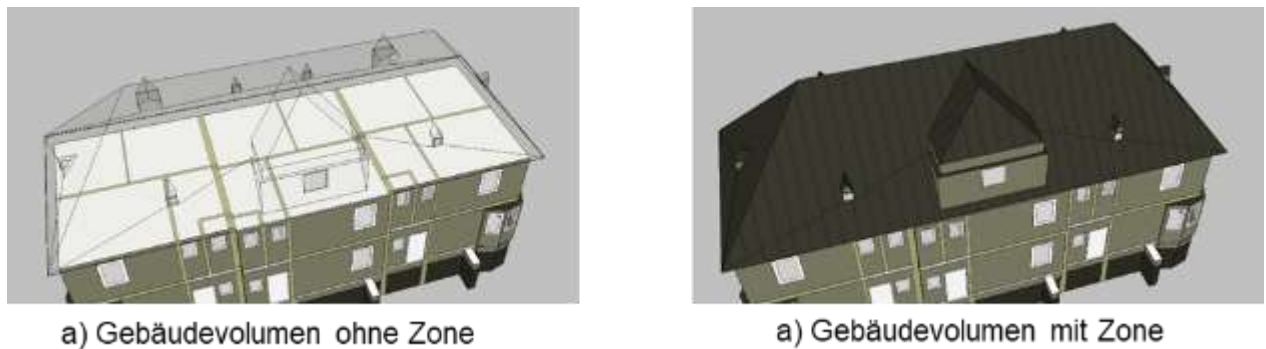


Abbildung 39: Dachgeschoss, Metzendorfstraße 38 ABC „Referenz Bestand 1995“

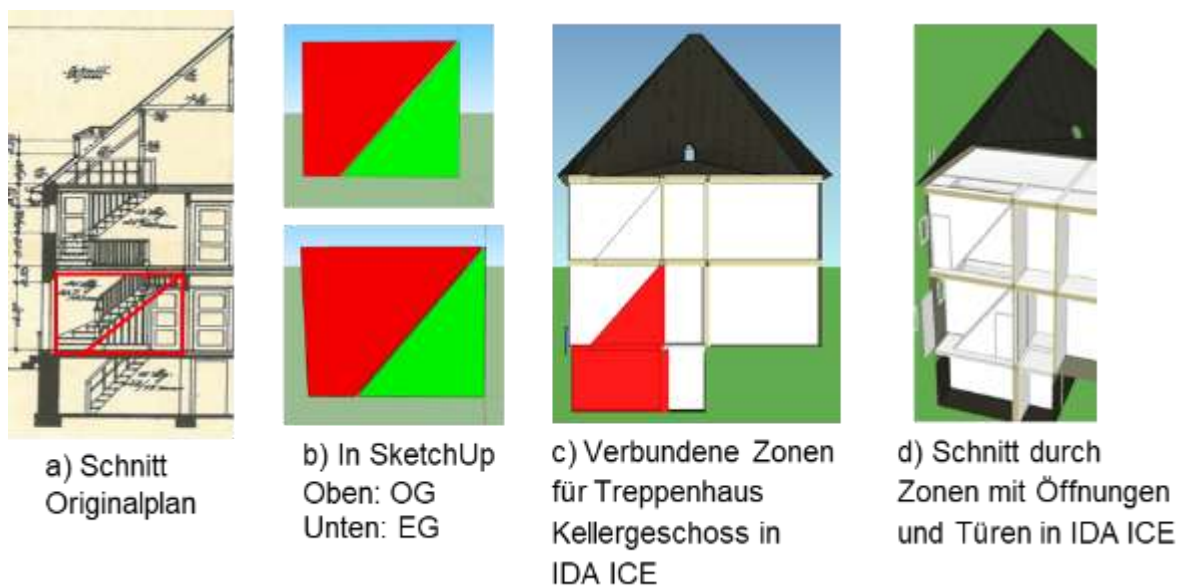


Abbildung 40: Darstellung der Treppenhauszonen



Abbildung 41: Ansicht und Horizontalschnitt Referenzvariante Metzendorfstraße 38 ABC

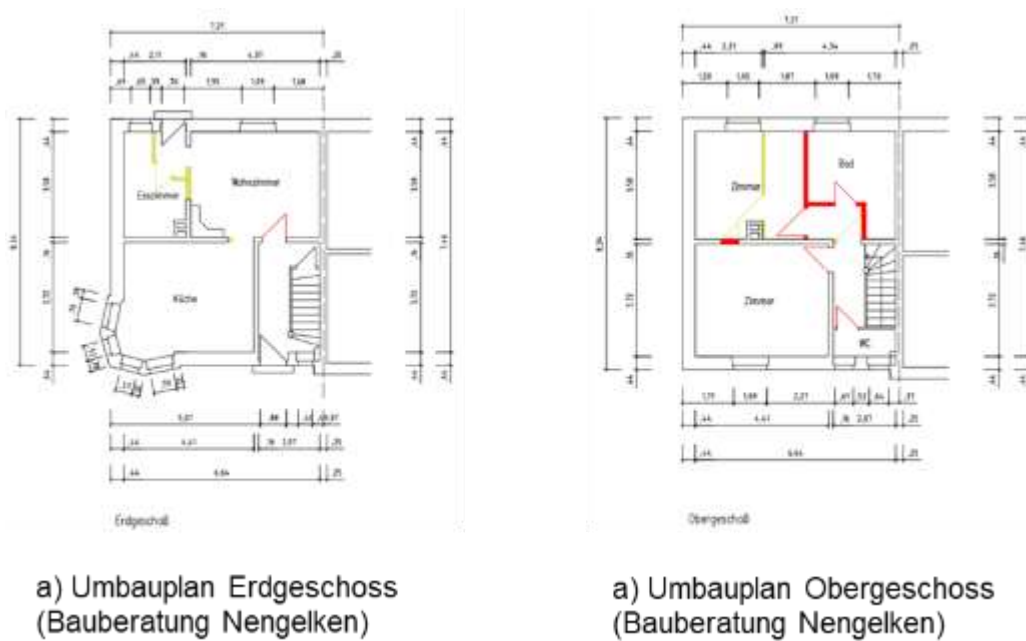


Abbildung 42: Grundrisse der Metzendorfstraße 38 C in den Varianten „Ist-Zustand“ und „Sanierung“.

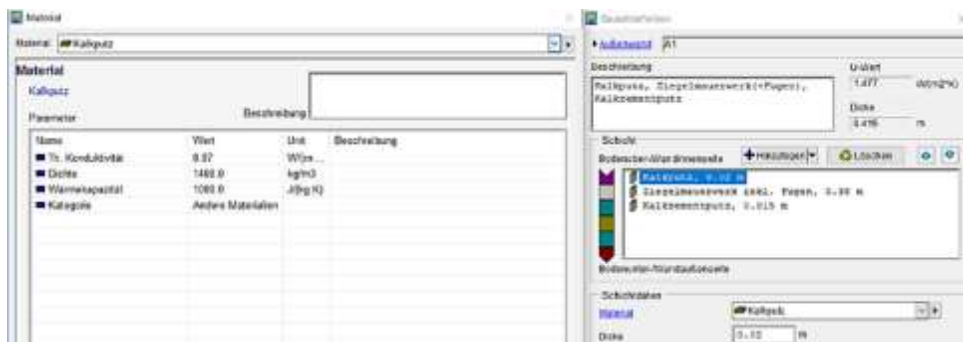


Abbildung 43: Bauteildefinition von A1 in IDA ICE

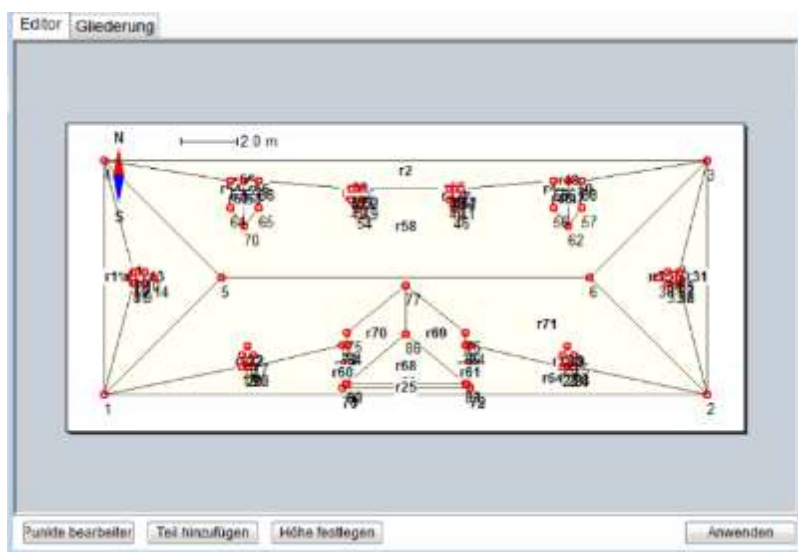


Abbildung 44: Dachgauben der Metzendorfstraße 38 ABC im Editor

Ein weiterer Schwerpunkt des Arbeitspakets lag auf der Definition belastbarer klimatischer und nutzungsbezogener Randbedingungen. Die Aufbereitung der Wetterdaten und deren Vergleich werden über Abbildung 46 bis Abbildung 55 dokumentiert.



```
% Good approximation for sky temperature %  
TskyModel = 1.5 * TairOvercast - TWind  
Tsky = TAir; if(TAir>Tsky)  
else  
% From TIRK model:  
Tsky = 278.15 + (TAir-273.15) + 10.765 + 0.761 * LOG(1+SATEND*(exp((279.15)/(Polynomial(1, 1), 0.021, 0.35, 0.15), SkyCover/100)))**0.25;  
end  
%  
% Linear approximation for second summation %  
Wwind = TWind
```

Seite 43 von 246

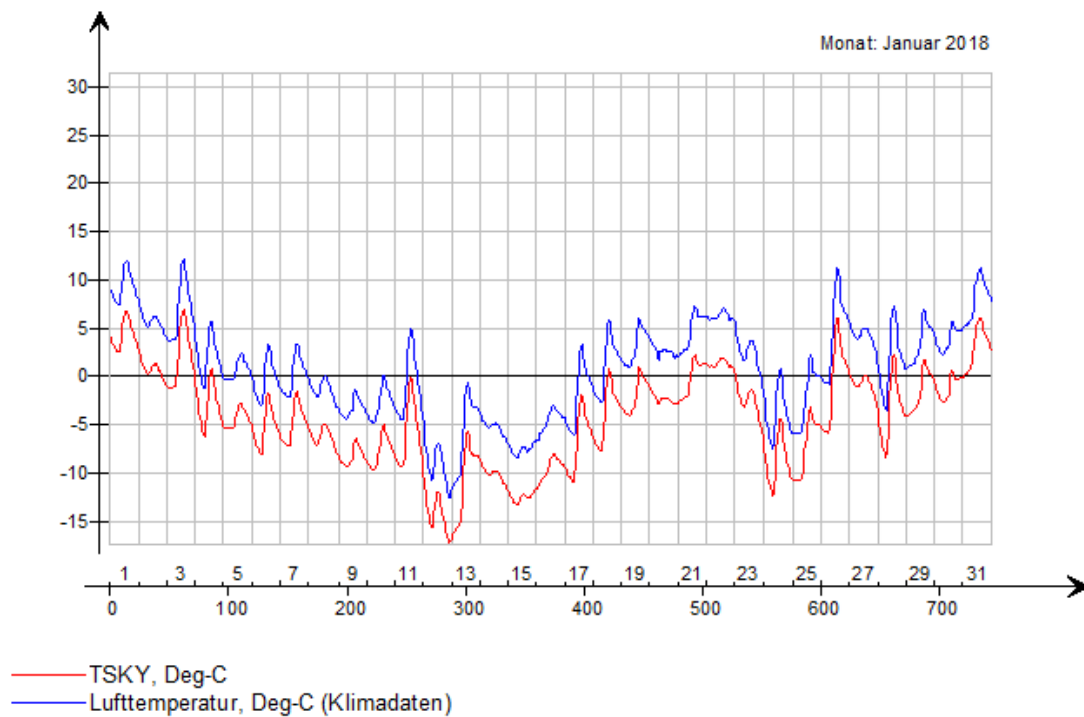


Abbildung 48: Verlauf der Himmelstemperatur und der Außentemperatur ohne Bedeckungsgrad

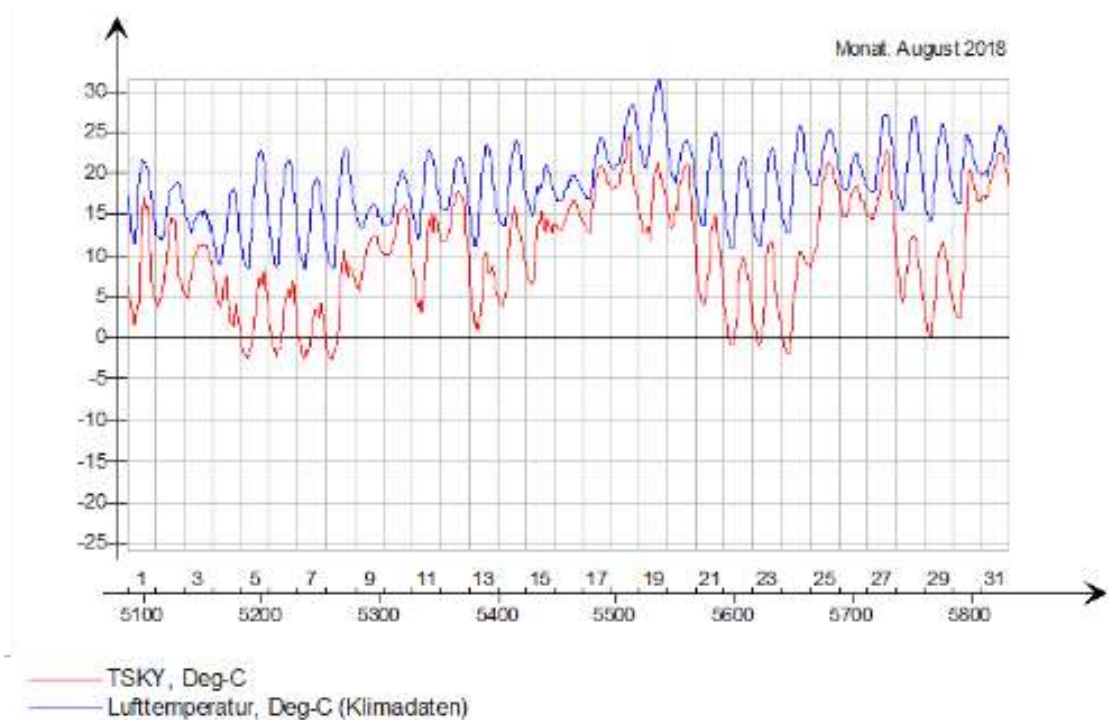


Abbildung 49: Verlauf der Himmelstemperatur und der Außentemperatur mit Bedeckungsgrad



Abbildung 50: Einteilung des DWD mit Markierung der Margarethenhöhe.

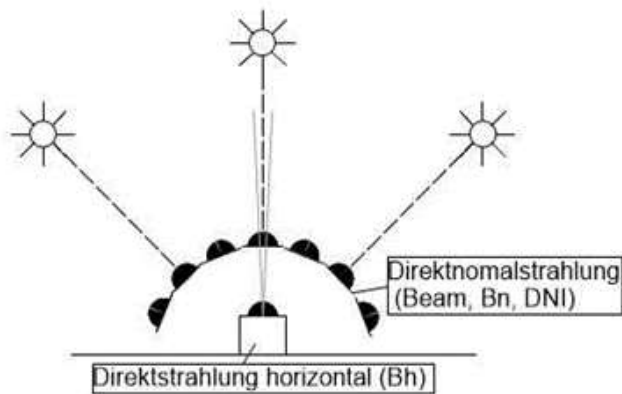


Abbildung 51: Unterschied Direktnormalstrahlung und horizontale Direktstrahlung



Abbildung 52: Koordinaten der Meteoronorm und DWD Dateien

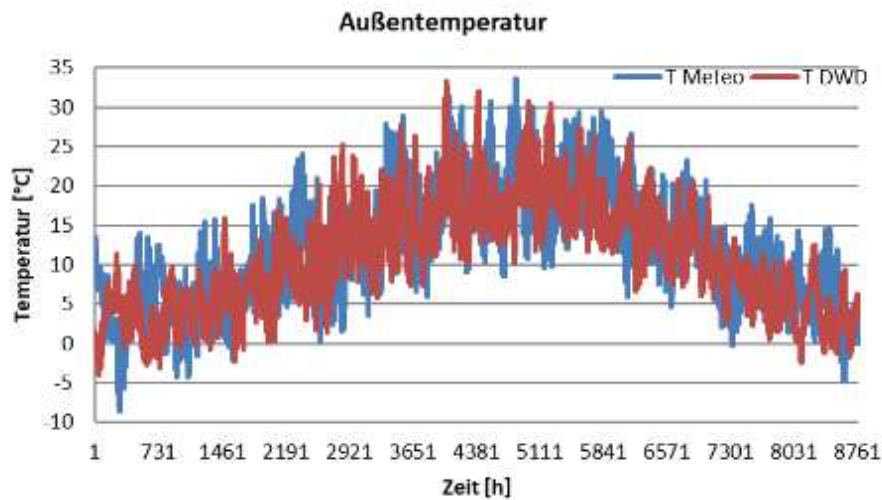


Abbildung 53: Außentemperaturverlauf der beiden Klimadienste für das Testreferenzjahr der Margarethenhöhe

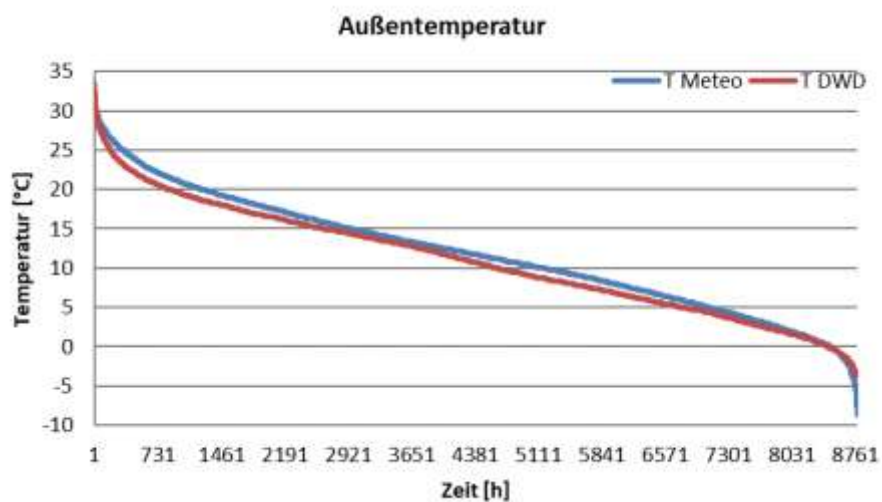


Abbildung 54: Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur

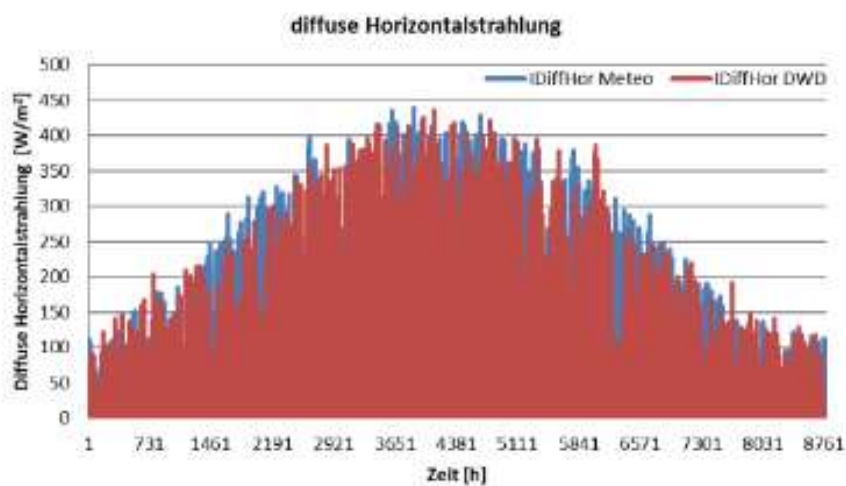


Abbildung 55: Jahresverlauf der diffusen Horizontalstrahlung bei Meteonorm und DWD

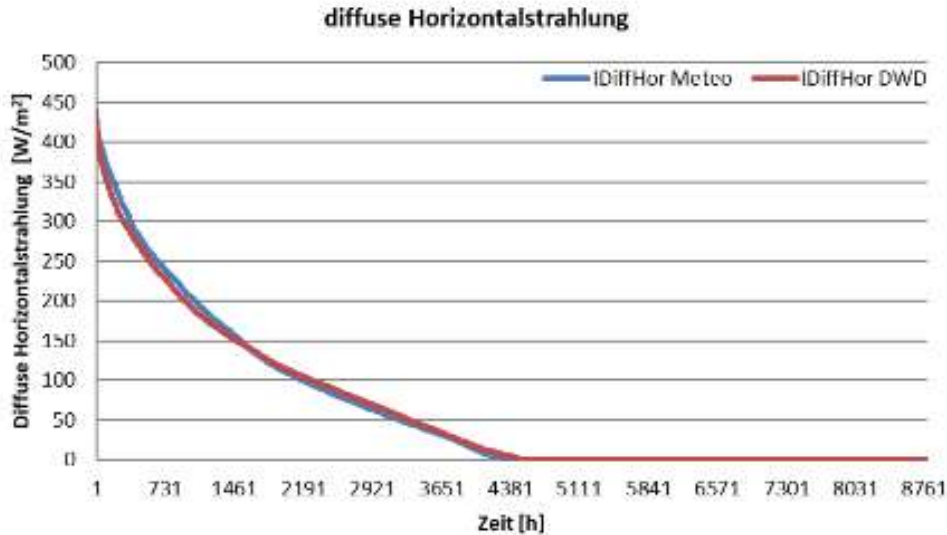


Abbildung 56: Häufigkeitsverteilung der diffusen Horizontalstrahlung

Hieran wird deutlich, dass die Randbedingungen nicht unreflektiert übernommen wurden, sondern hinsichtlich ihrer Eignung für den Standort geprüft und angepasst wurden. Gerade für die Bewertung denkmalverträglicher Sanierungsvarianten ist diese Sorgfalt erforderlich, da die energetische und thermische Reaktion historischer Gebäude stark von realistischen Wetterannahmen abhängt.

In gleicher Weise wurden die nutzungsabhängigen Eingangsgrößen nicht pauschal angesetzt, sondern differenziert hergeleitet. Die zugrunde gelegten Annahmen zum Warmwasserbedarf, zur Belegung, zur Verteilung interner Gewinne und zum Lüftungsverhalten werden in Abbildung 57 bis Abbildung 67 dargestellt.

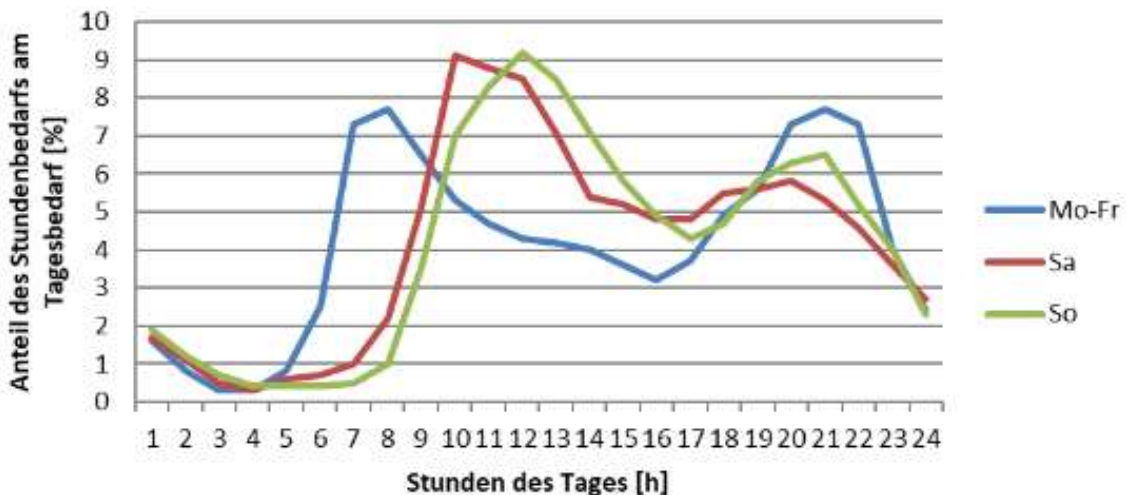


Abbildung 57: Tagesprofile des Warmwasserbedarfs nach VDI 6002 Blatt 1

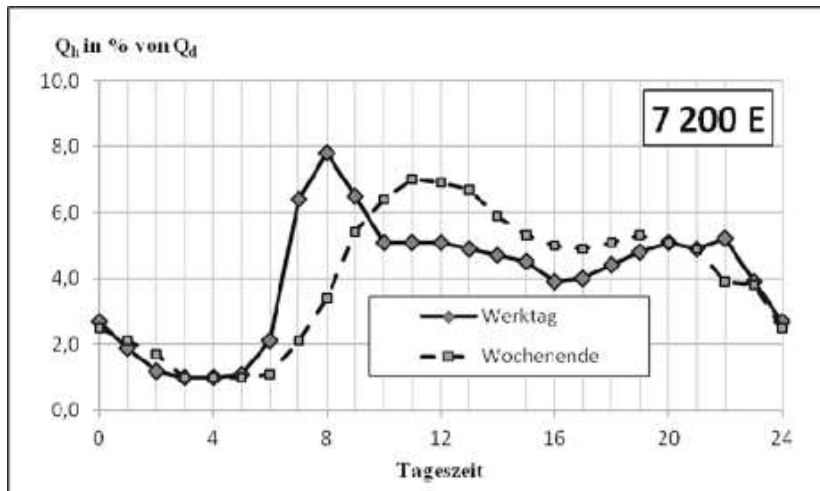


Abbildung 58: Wasserbedarf-Ganglinie Q_h einer Versorgungszone in Stuttgart mit ca. 7.200 Einwohnern

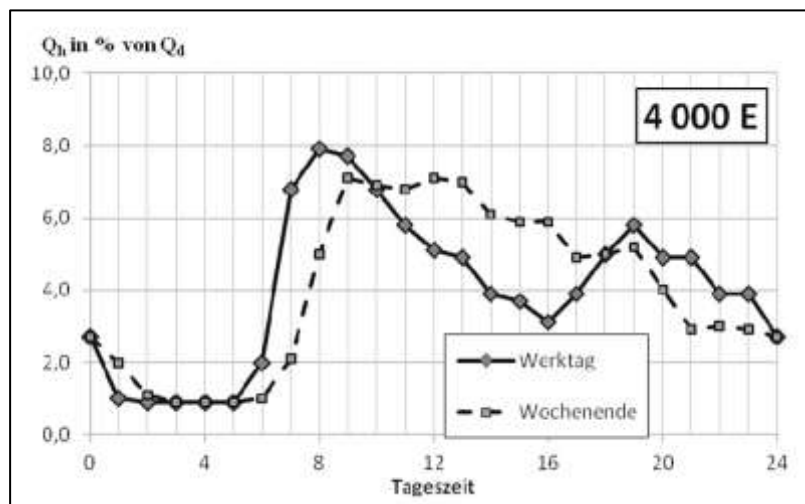


Abbildung 59: Wasserbedarf-Ganglinie Q_h einer Versorgungszone in Stuttgart mit ca. 4.000 Einwohnern

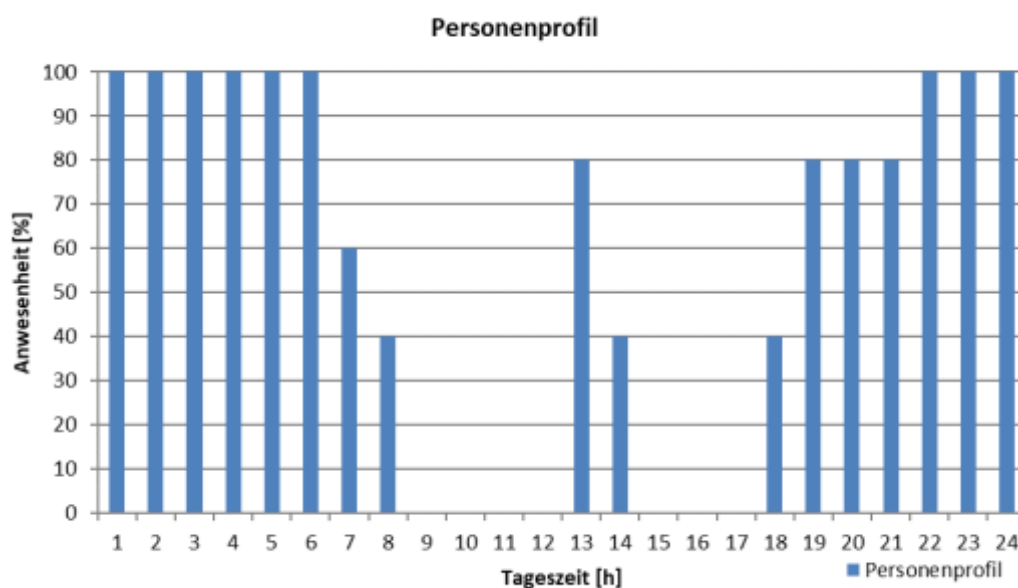


Abbildung 60: Tagesverteilung der Anwesenheit der Personen nach SIA 2014

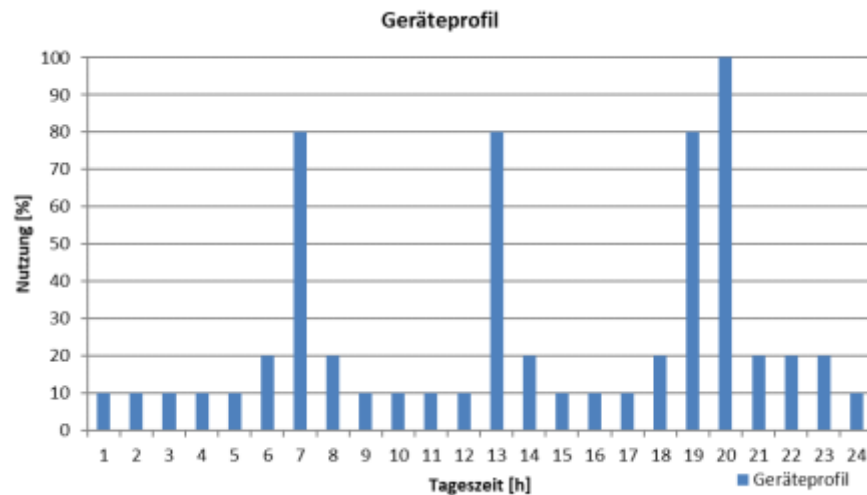


Abbildung 61: Gerätenutzungsverteilung über einen Tag nach SIA 2014

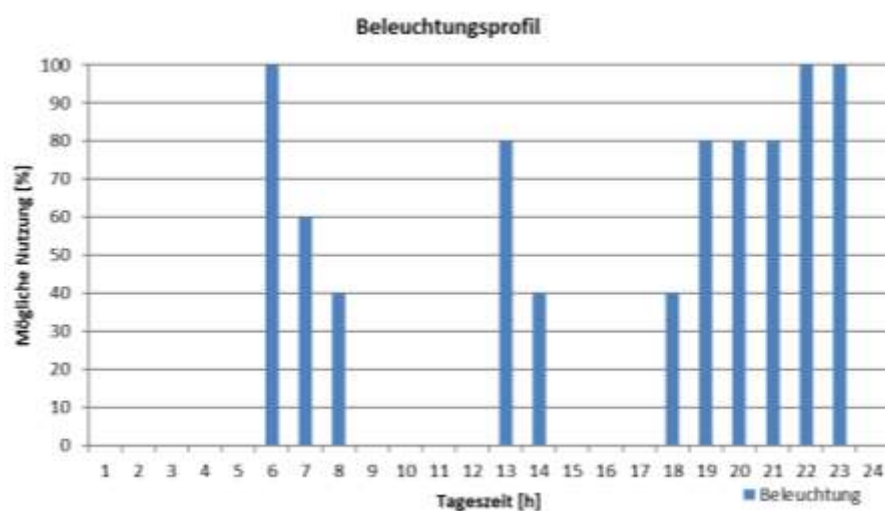


Abbildung 62: Mögliche Beleuchtungszeiten

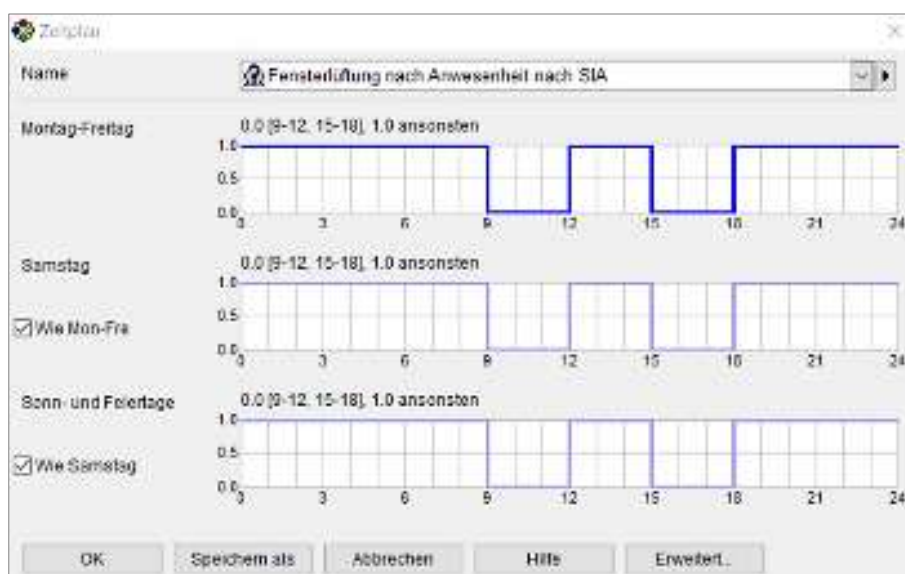


Abbildung 63: Zeitplan der Fensterlüftung in IDA ICE

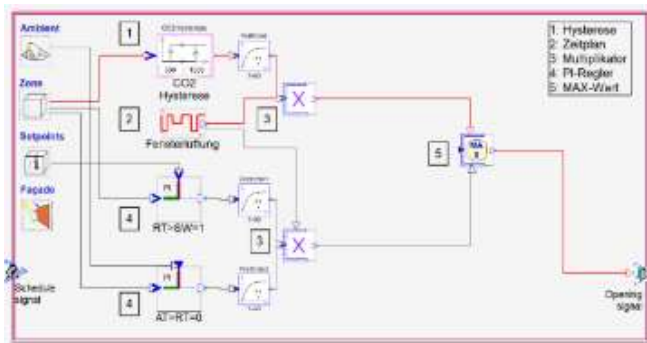


Abbildung 64: Regelung „Fensterlüftung“, CO₂-Regelung

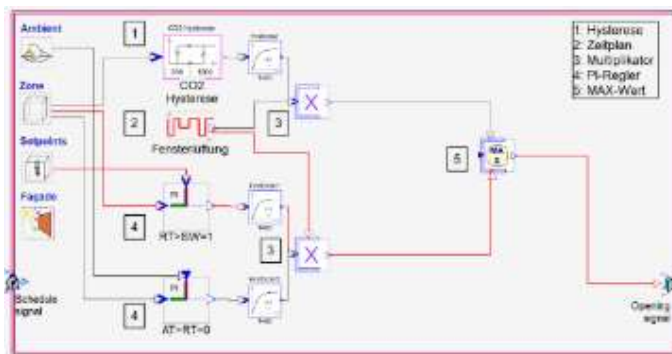


Abbildung 65: Regelung „Fensterlüftung“, Kühlungsbedarf

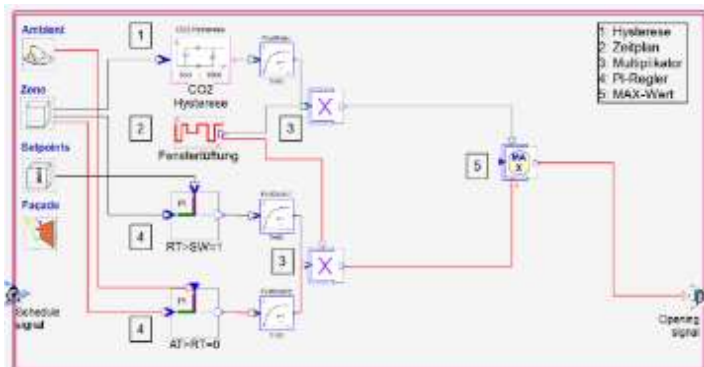


Abbildung 66: Regelung „Fensterlüftung“, Möglichkeit einer Kühlung

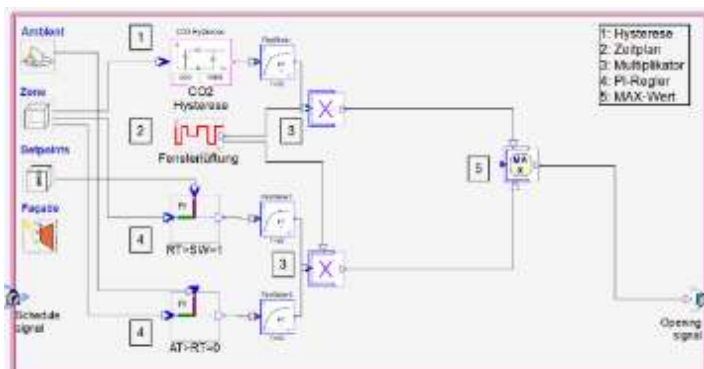


Abbildung 67: Regelung „Fensterlüftung“, Weiterleitung der Outputsignale

Tabellarisch werden diese Annahmen in Tabelle 9 bis Tabelle 13 hinterlegt. Methodisch ist hervorzuheben, dass die thermische Gebäudesimulation damit auf standort- und nutzungsbezogenen Randbedingungen aufbaut und nicht lediglich auf normativen Standardannahmen.

Tabelle 9: Verbale Bezeichnung des Gesamtbedeckungsgrades nach DWD

Bezeichnung	Erläuterung	
Wolkenlos, sonnig, klar (nur nachts)	Gesamtbedeckungsgrad 0/8	
Leicht bewölkt, heiter (nur tagsüber)	Bedeckungsgrad tiefer und mittelhoher Wolken 1 bis 3/8	Hohe Wolken bis 8/8 möglich
Wolkig	Bedeckungsgrad tiefer und mittelhoher Wolken 4 bis 6/8	
Stark bewölkt	Bedeckungsgrad tiefer und mittelhoher Wolken 7/8	
Bedeckt oder trüb	Bedeckungsgrad tiefer und mittelhoher Wolken 8/8; trüb, wenn tiefe Bewölkung einen Bedeckungsgrad von 8/8 hat	
In Wolken	Gilt nur für Bergstationen (Station in Wolken)	
Wechselnd bewölkt	Bei wiederholt deutlichen Änderungen des Bedeckungsgrades innerhalb des Bezugszeitraumes	

Tabelle 10: Statistische Belegungszahl n_p von Wohnungen nach VDI 6002 Blatt 1, VDI 2067-12

Anzahl der Räume	Belegungszahl n_p
1	1,2
2	1,6
3	2,3
4	2,8
5	3,1
6	3,4
7 und mehr	3,8
Anmerkung 1: Räume < 6 m ² werden nicht als Räume berücksichtigt	
Anmerkung 2: Küchen werden nicht als Räume berücksichtigt	

Tabelle 11: Belegungsanzahl je Wohnung in den ausgewählten Gebäuden je Simulationsvariante.

	Metzendorfstraße 38 ABC		Sonnenblick 6 und 8	
	Räume	Belegungsanzahl	Räume	Belegungsanzahl
Referenz Bestand 1995	5	3,1	4	2,8
Ist-Zustand 2018/ Sanierung 2018	6	3,4	EG	5
			OG	4

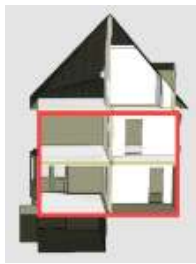
Tabelle 12: Eingabewerte für die internen Wärmegewinne nach SIA 2024

Personen			Geräte		Beleuchtung	
Aktivitätsgrad	1,2 met		Wärmeeintragsleistung	8,0 W/m ²	Wärmeeintragsleistung	2,7 W/m ²
Wärmedämmwert der Bekleidung	Winter	1,0 clo			Leuchten-Lichtausbeute	33 lm/w
	Sommer	0,5 clo				

Tabelle 13: Personenverteilung über die Fläche der personenbelegten Räume.

	Metzendorfstraße 38 ABC				Sonnenblick 6 und 8			
	Person		Wohnfläche [m ²]	Person /m ²	Person		Wohnfläche [m ²]	Person /m ²
Referenz Bestand 1995	A/C	3,1	82,2	0,0377	EG	2,8	76,1	0,0368
	B	3,1	84,3	0,0368	OG	2,8	76,1	0,0368
Ist-Zustand 2018/ Sanierung 2018	A/C	3,4	112,2	0,0303	EG	3,1	75	0,0413
	B	3,4	120,9	0,0281	OG	2,8	76,1	0,0368

Die Variantenbildung wurde so aufgebaut, dass sich sowohl der Einfluss einzelner Sanierungsbausteine als auch deren Zusammenwirken beurteilen lässt. Dies wird über Abbildung 68 bis Abbildung 73 anschaulich gemacht.



a) Referenz



b) Ist-Zustand



c) Sanierung HK



d) Sanierung FBH

Abbildung 68: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Metzendorfstraße 38 C mit gekennzeichneten Gebäudevolumen



a) Referenz



b) Ist-Zustand



c) Sanierung HK



d) Sanierung FBH

Abbildung 69: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Sonnenblick 8 mit gekennzeichneten Gebäudevolumen



a) Referenz Bestand 1995



b) Variante Sanierung mit Heizkörpern

Abbildung 70: Schnitt durch Metzendorfstraße 38 C mit gekennzeichneten Gebäudevolumen



a) Referenz



b) Ist-Zustand

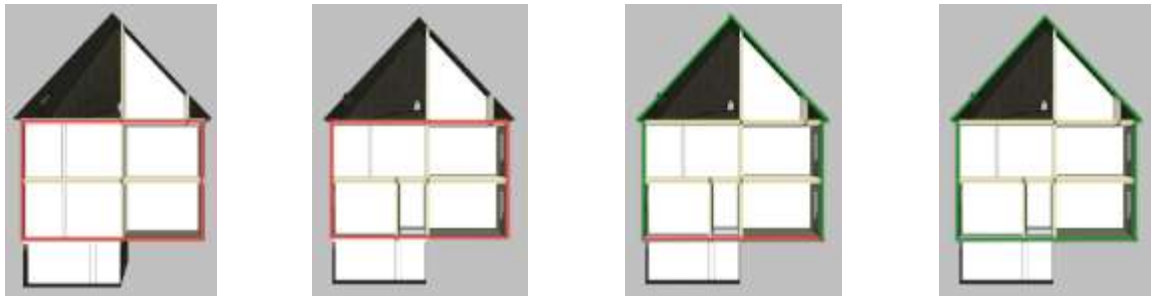


c) Sanierung HK



d) Sanierung FBH

Abbildung 71: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Metzendorfstraße 38 C mit gekennzeichneten Gebäudevolumen



a) Referenz

b) Ist-Zustand

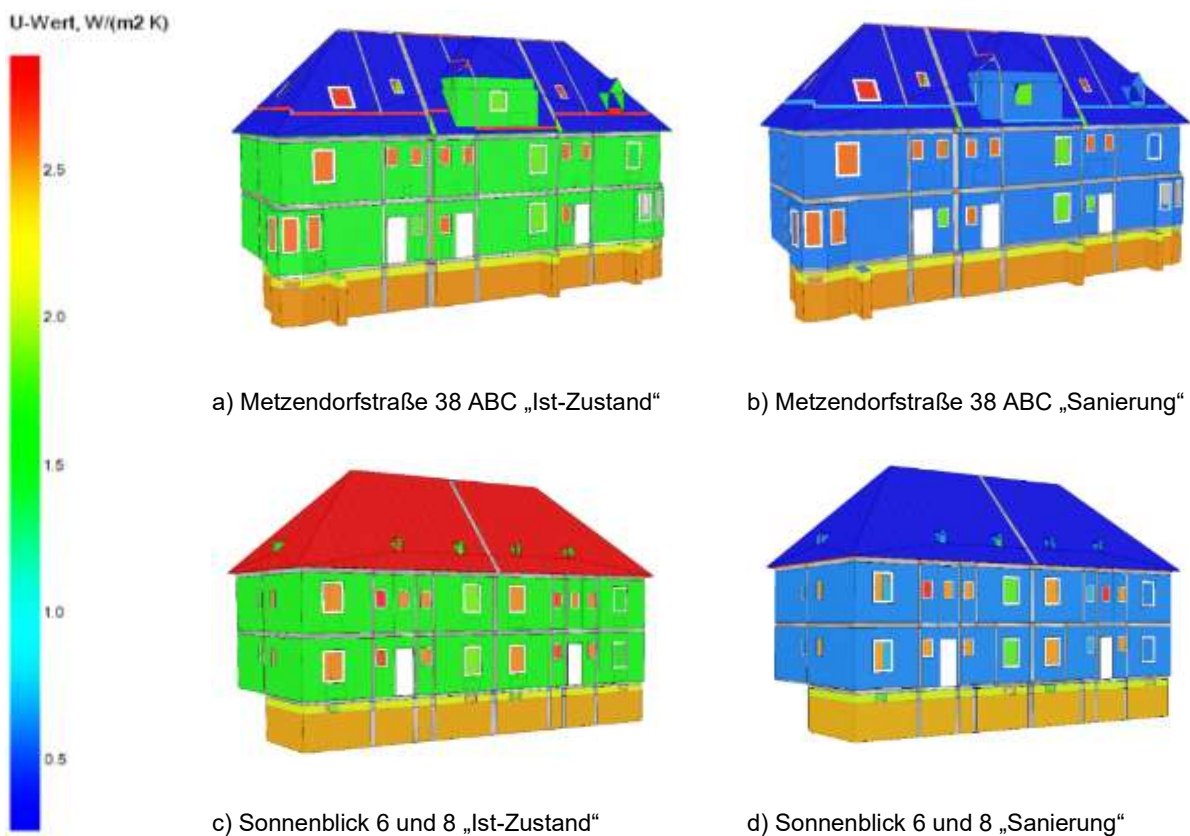
c) Sanierung HK

d) Sanierung FBH

Abbildung 72: Übersicht der Varianten, Schnitt durch Sonnenblick 8 mit gekennzeichneten Gebäudevolumen

Ergänzend fassen Tabelle 14 bis

Tabelle 16 die untersuchten Zustände systematisch zusammen. Für die fachliche Bewertung ist dies von erheblicher Bedeutung, weil die Ergebnisse des Arbeitspakets nicht als Aussage zu einer singulären Maßnahme verstanden werden dürfen, sondern als Variantenvergleich unter denkmalpflegerischen Randbedingungen.



a) Metzendorfstraße 38 ABC „Ist-Zustand“

b) Metzendorfstraße 38 ABC „Sanierung“

c) Sonnenblick 6 und 8 „Ist-Zustand“

d) Sonnenblick 6 und 8 „Sanierung“

Abbildung 73: Darstellung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehüllen

Tabelle 14: Übersicht der Sanierungsvarianten

	Metzendorfstraße 38 ABC		Sonnenblick 6 und 8	
	Sanierung Heizkörper	Sanierung Fußbodenheizung	Sanierung Heizkörper	Sanierung Fußbodenheizung
Dach U-Wert [W/m²K]	0,21	0,21	0,21	0,21
AW U-Wert [W/m²K]	0,54	0,54	0,54	0,54
Fenster U-Wert [W/m²K]	1,6	1,6	1,6	1,6
EG - Fußboden unterkellert/ nicht unterkellert U-Wert [W/m²K]	1,7/ 2,9	0,57/ 0,66	1,7/ 2,9	0,56/ 0,66
Wärmeverbraucher	HK → VL: 45°C	FBH → VL: 35°C	OG: HK EG: HK	→ VL: 60°C FBH → VL: 35°C
Warmwasser	Trinkwasser-station	Kombination mit Durchlauferhitzer	Trinkwasser-station	Kombination mit Durchlauferhitzer
Wärmeerzeuger	WP	WP	WP	WP
Leistung gewählte WP [kW]	29,6	22,35	29,6	22,35
Erdsonden	5 EWS je 150 m Abstand: 6 m	5 EWS je 100 m Abstand: 6 m	5 EWS je 150 m Abstand: 8 m	5 EWS je 100 m Abstand: 8 m

Tabelle 15: Vergleich der gegebenen Bauteile aus dem Bauteilkatalog und deren Sanierungsvarianten mit den Normbauteilen nach Mindestwärmeschutz

Bauteile	Anforderungen der Bauteile nach Norm			Bauteile nach Bauteilkatalog		
		R [m²K/W]	U-Wert [W/(m²K)]	Bauteil-bezeichnungen	R [m²K/W]	U-Wert [W/(m²K)]
Wände beheizter Räume	Gegen Außenluft, nicht beheizte Räume	1,2	0,73	A1	0,507	1,48
				A1-gedämmt ^{*)}	1,59	0,57
				I11	0,189	2,23
Dachschrägen beheizter Räume	Gegen Außenluft	1,2	0,75	DA1-gedämmt ^{*)}	3,83	0,28
Decken beheizter Räume nach oben	Zu nicht beheizten Räumen	0,9	0,91	D3	0,433	1,58
	Zu Räumen zwischen gedämmten Dachschräge	0,35	1,8	D3	0,433	1,58
Decken beheizter Räume nach unten	Gegen nicht beheizten Kellerraum	0,9	0,81	D1	0,402	1,35
	Unterer Abschluss von Aufenthaltsräumen unmittelbar an das Erdreich grenzend	0,9	0,93	B1	0,173	2,91
Bauteile zwischen beheizten Räumen	Wohnungs- und Gebäudetrennwände zwischen beheizten Räumen	0,07	3,03	Z2	0,374	1,58
	Wohnungstrenndecken, Decken zwischen Räumen unterschiedlicher Nutzung	0,35	1,8	D2	0,169	2,71

^{*)}Ersetzt in der Variante „Sanierung“ die Bauteile A1 und DA1

Tabelle 16: Zugrunde gelegte Bezugswerte der operativen Innentemperatur für die Sommerklimaregionen und Übertemperaturgradstundenanforderungswerte

Sommerklimaregion	Bezugswert $\theta_{b,op}$ der Innentemperatur [°C]	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden [Kh/a]	
		Wohngebäude	Nichtwohngebäude
A	25	1200	500
B	26		
C	27		

Ein wichtiger Ergebniskomplex betrifft die Frage, wie sich die Sanierungsvarianten auf Oberflächentemperaturen, Feuchtesicherheit und sommerlichen Wärmeschutz auswirken. Der Zusammenhang von Innenlufttemperatur und relativer Luftfeuchte wird in Abbildung 74 veranschaulicht. Die daraus resultierenden Innenoberflächentemperaturen werden über Abbildung 75 bis Abbildung 78 vergleichend ausgewiesen. Dabei wird deutlich, dass die Hüllmaßnahmen nicht nur energietechnisch, sondern auch hinsichtlich der inneren Oberflächenbedingungen relevant sind. Die Sanierung ist demnach nicht allein als Maßnahme zur Reduktion von Transmissionsverlusten zu verstehen, sondern auch als Beitrag zur Verbesserung thermischer Robustheit und zur Verringerung lokaler kritischer Oberflächenzustände.

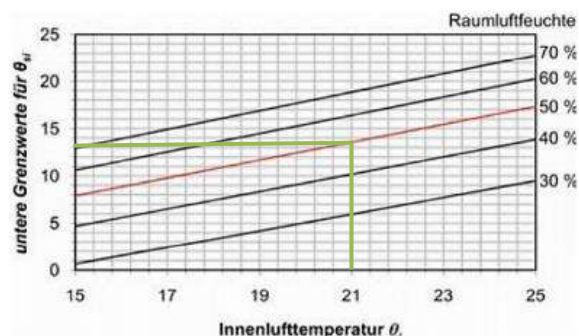


Abbildung 74: Zusammenhang zwischen Innenlufttemperatur, Raumlufteuchte und mindestens erforderlicher Innenoberflächentemperatur für eine oberflächennahe Luftfeuchte von 80 %



Abbildung 75: Innenoberflächentemperaturen [°C], Metzendorfstraße 38 ABC



Abbildung 76: Innenoberflächentemperaturen [°C], Sonnenblick 6 und 8



Abbildung 77: Innenoberflächentemperaturen bei 13 °C, Metzendorfstraße 38 ABC

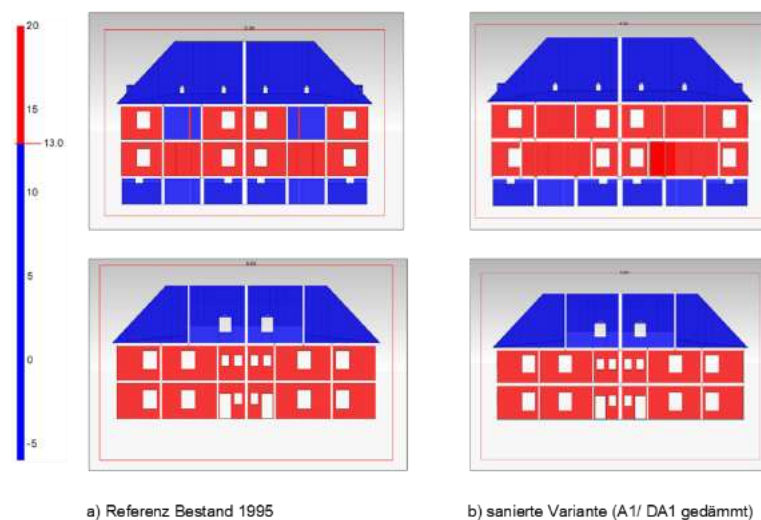


Abbildung 78: Innenoberflächentemperaturen bei 13 °C, Sonnenblick 6 und 8

Der sommerliche Wärmeschutz wurde ausdrücklich mitbetrachtet, um Zielkonflikte zwischen winterlicher Energieeinsparung und sommerlicher Behaglichkeit sichtbar zu machen. Die Bewertungsgrundlage hierfür liefern Abbildung 79 bis Abbildung 83. Aus der Zusammenstellung wird ersichtlich, dass die Variantenbildung nicht einseitig auf die Heizperiode ausgerichtet war, sondern auch sommerliche Überwärmungseffekte berücksichtigt wurden. Dies ist insbesondere für Dach- und Dachgeschossvarianten relevant, da energetische Verbesserungen im historischen Bestand nur dann überzeugend sind, wenn sie nicht zu unzulässigen sommerlichen Komforteinbußen führen.

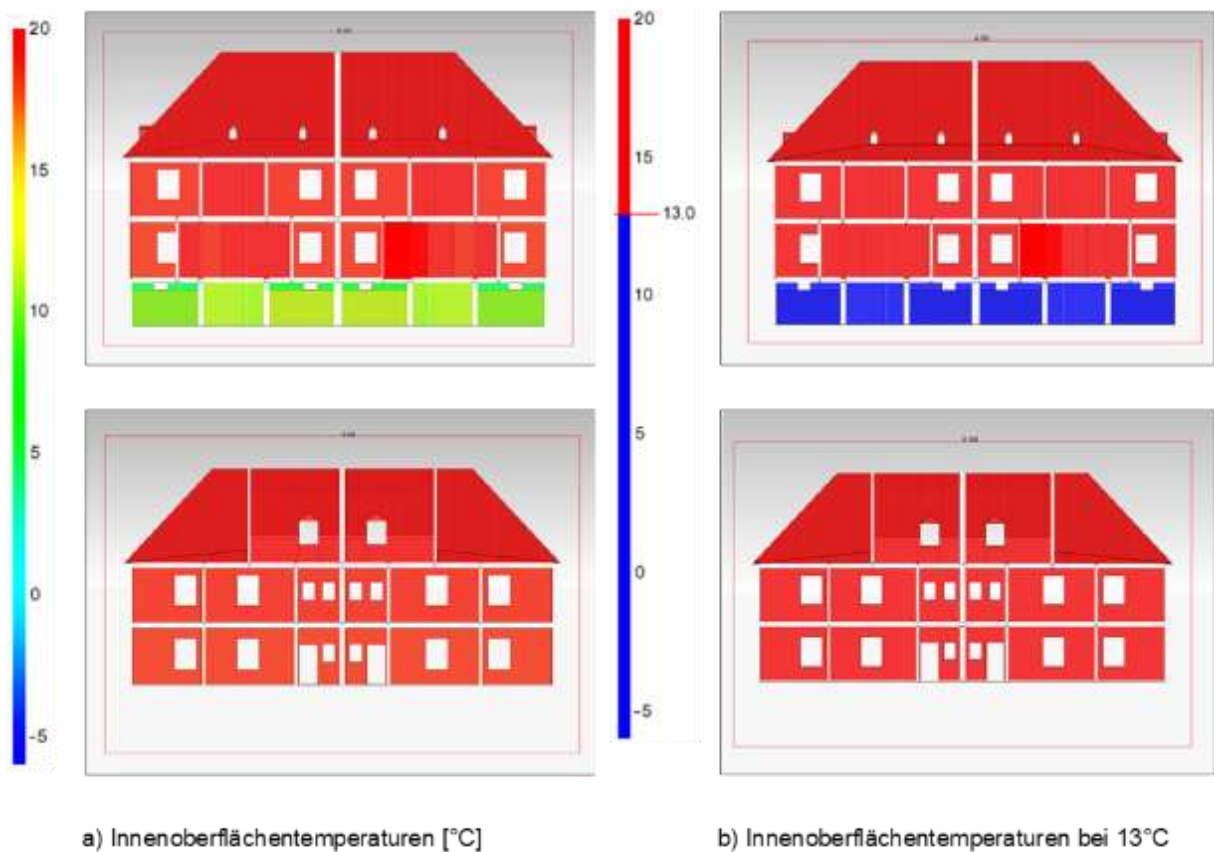


Abbildung 79: Sanierungsvariante mit beheiztem Dachgeschoss, Sonnenblick 6 und 8

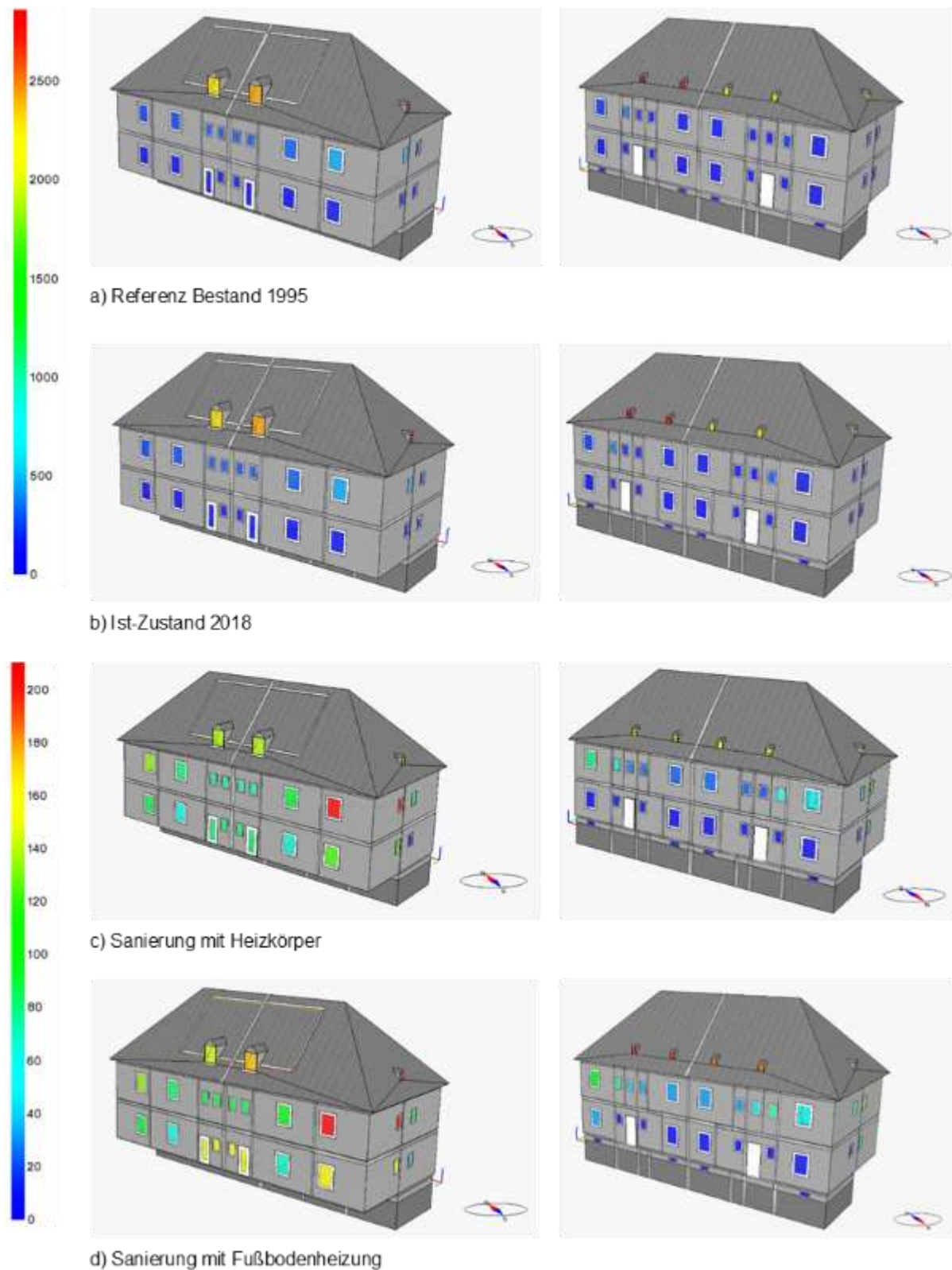


Abbildung 80: Anzahl Übertemperaturgradstunden [Kh/a] der Varianten des Gebäudes Sonnenblick 6 + 8

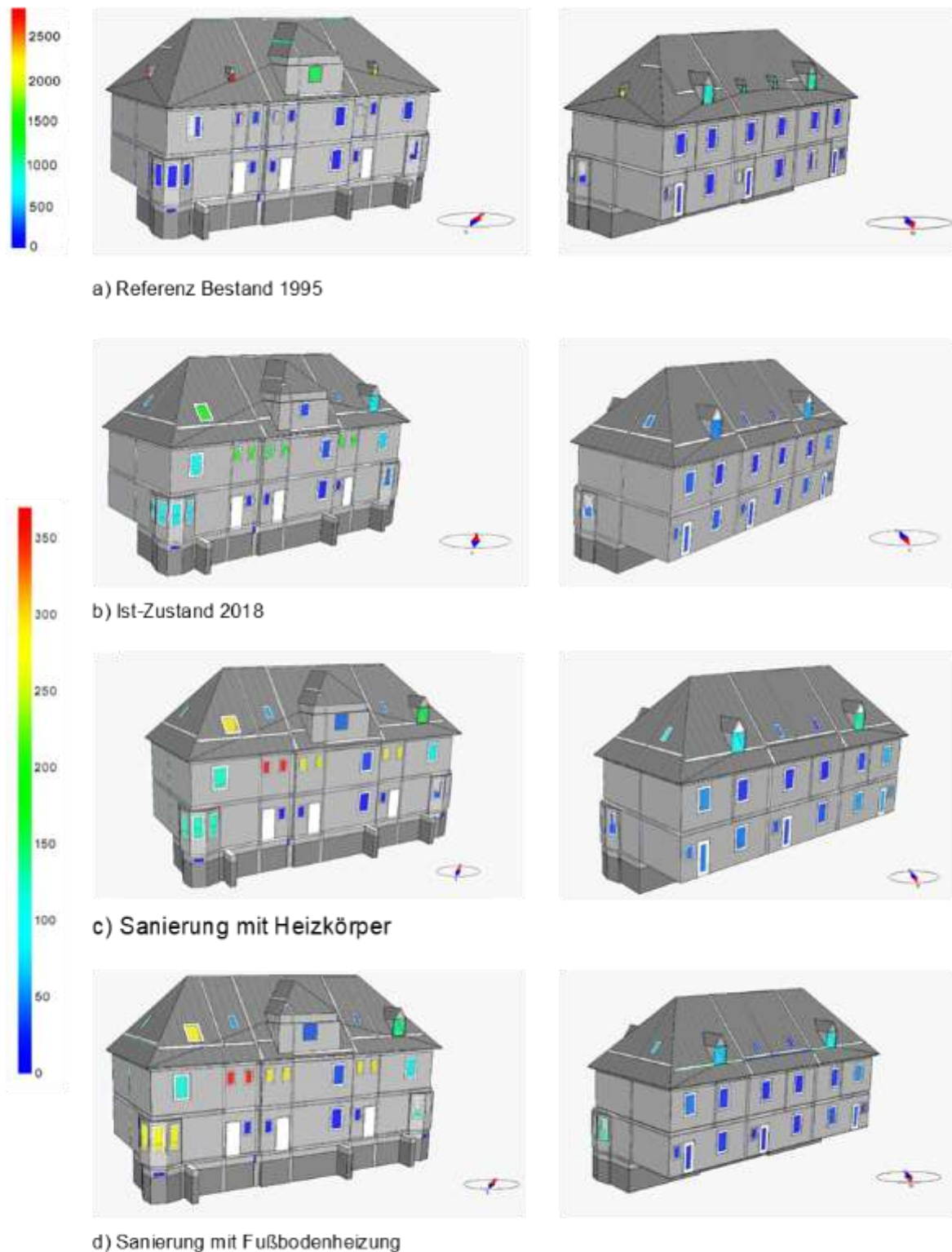


Abbildung 81: Anzahl Übertemperaturgradstunden [Kh/a] der Varianten des Gebäudes Metzendorfstraße 38 ABC

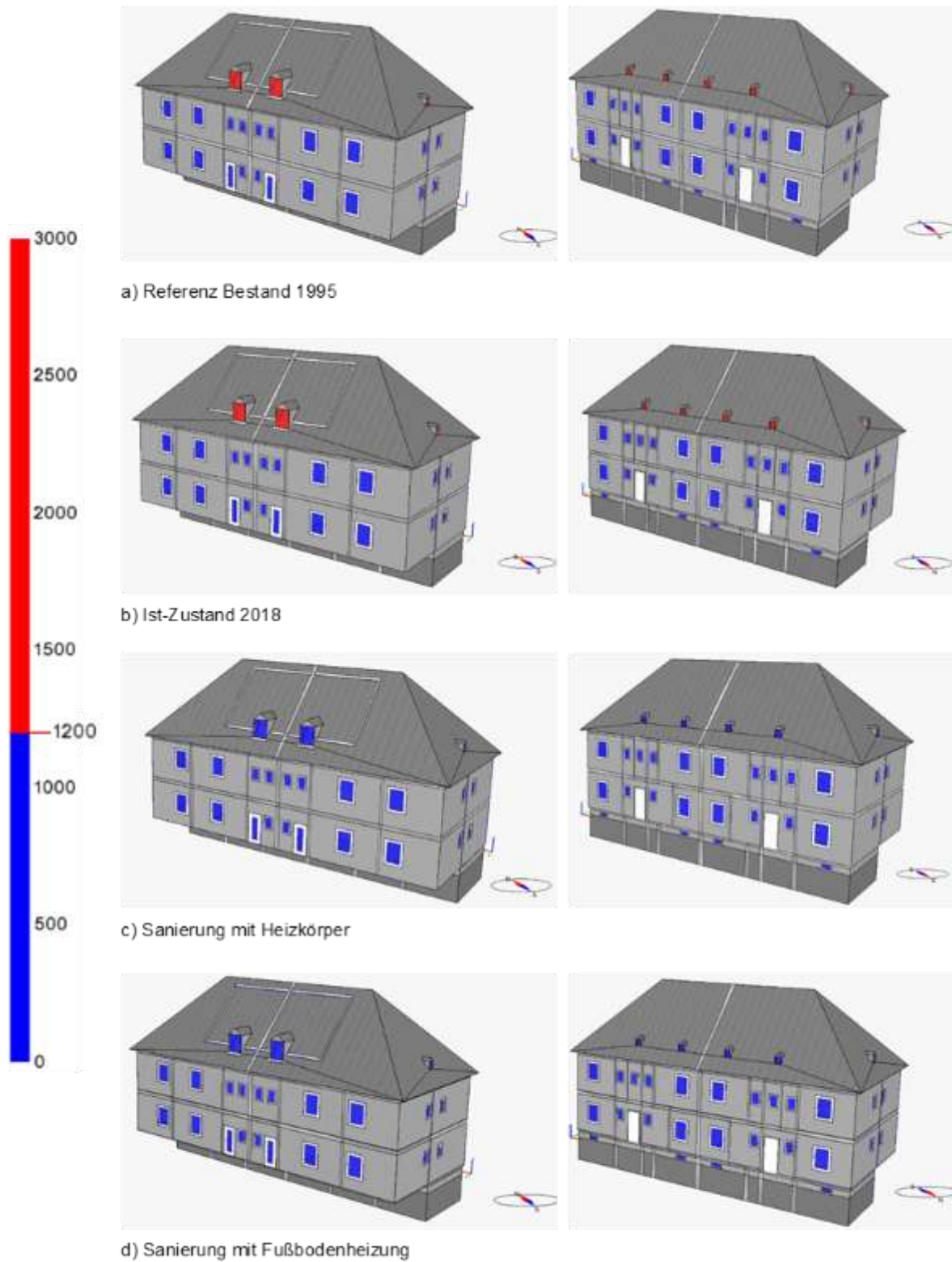


Abbildung 82: Übertemperaturgradstunden bei 1200 Kh/a Sonnenblick 6 und 8

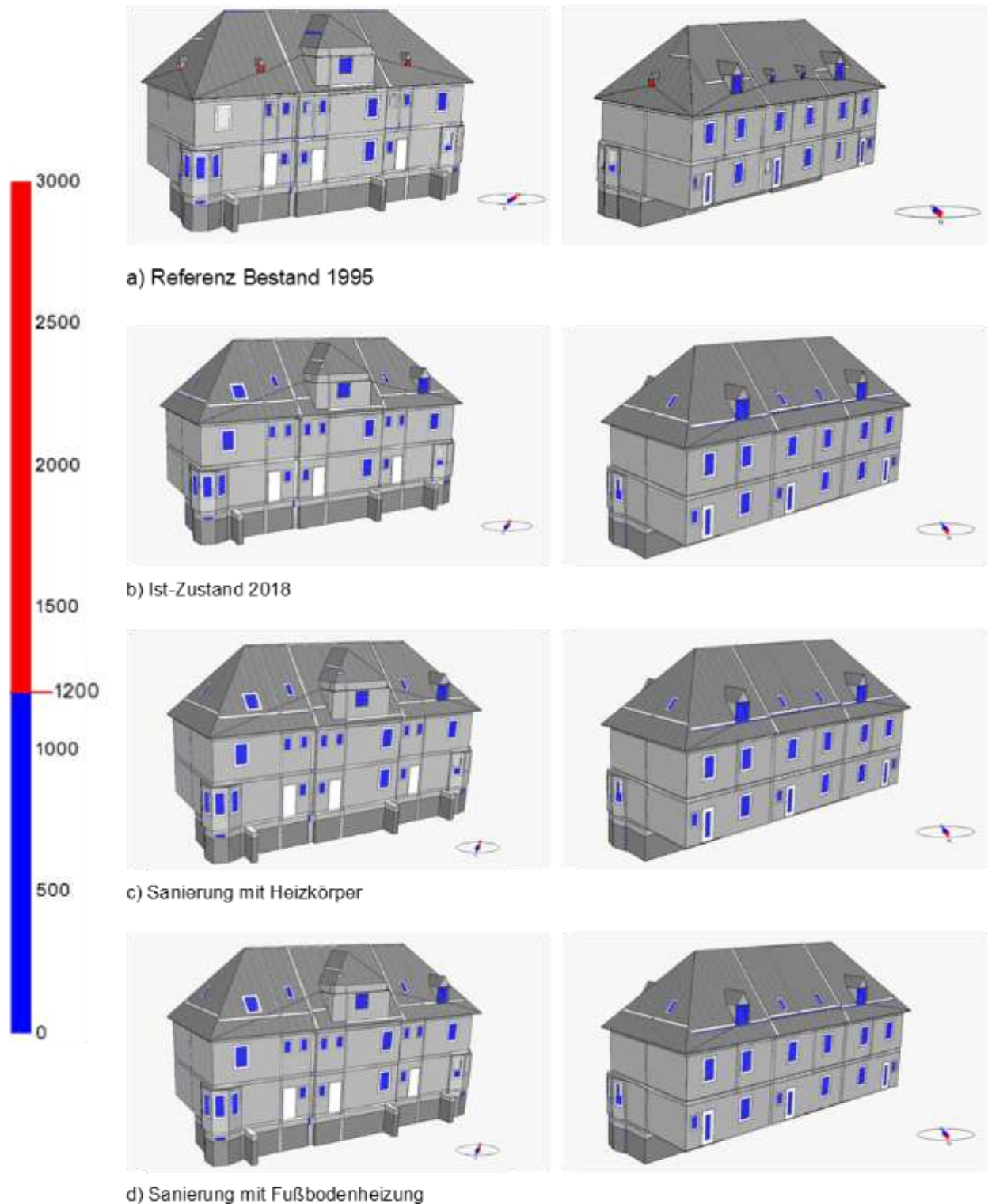


Abbildung 83: Übertemperaturgradstunden bei 1200 Kh/a Metzendorfstraße 38 ABC

Ein weiterer zentraler Auswertungsschwerpunkt lag auf der Ableitung von Anforderungen an die Wärmeübergabe. Die Zusammenhänge zwischen Dämmstärke und Heizlast werden in Abbildung 84 bis Abbildung 87 herausgearbeitet.

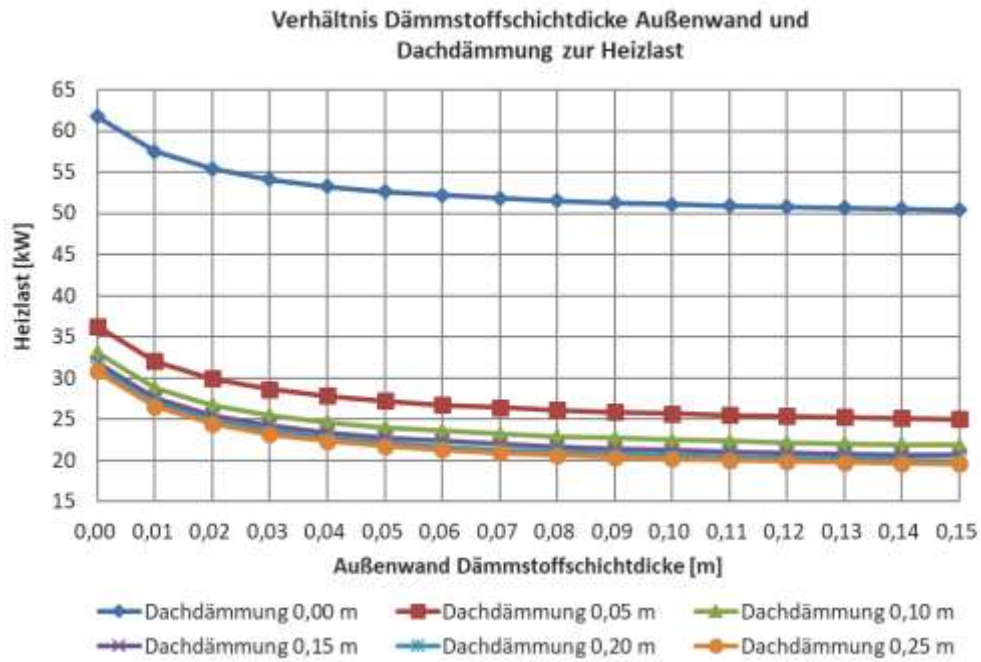


Abbildung 84: Verhältnis der Dicke der Wärmedämmputzschicht (0-15 cm) und der Dachdämmstoffdicke (0-25 cm) zur Heizlast

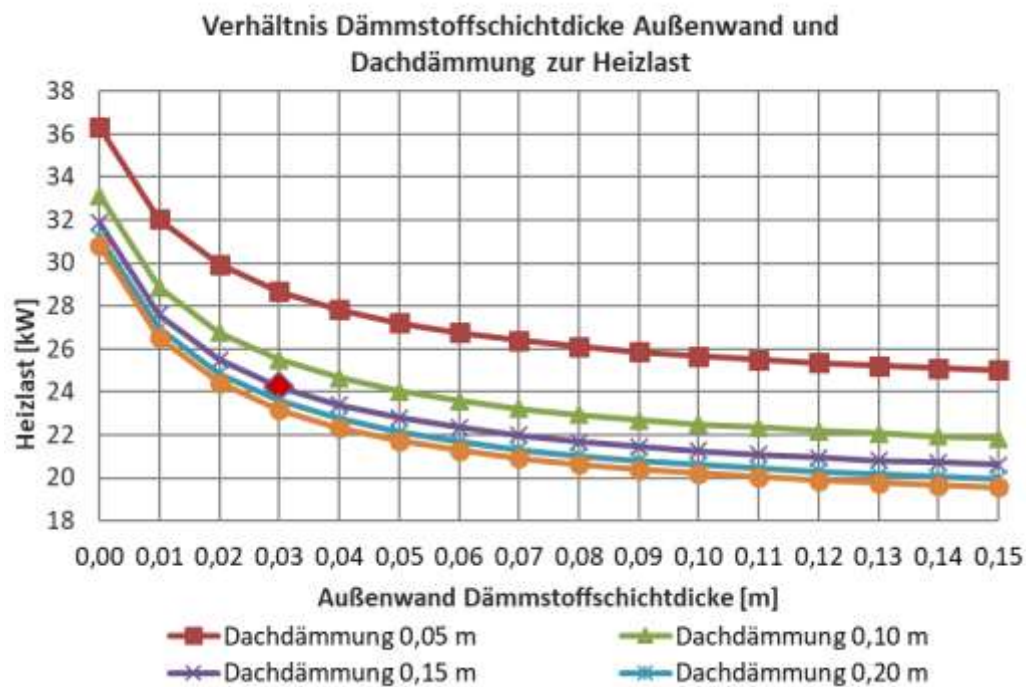


Abbildung 85: Verhältnis der Dicke der Wärmedämmputzschicht (0-15 cm) und der Dachdämmstoffdicke (5-25 cm) zur Heizlast



Abbildung 86: Einfluss der Dämmstoffdicke des Dachs auf die Heizlast



Abbildung 87: Einfluss der Dämmstoffschichtdicke der Wand auf die Heizlast

Ergänzend werden mit Abbildung 88 bis Abbildung 93 die untersuchten Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme dargestellt.

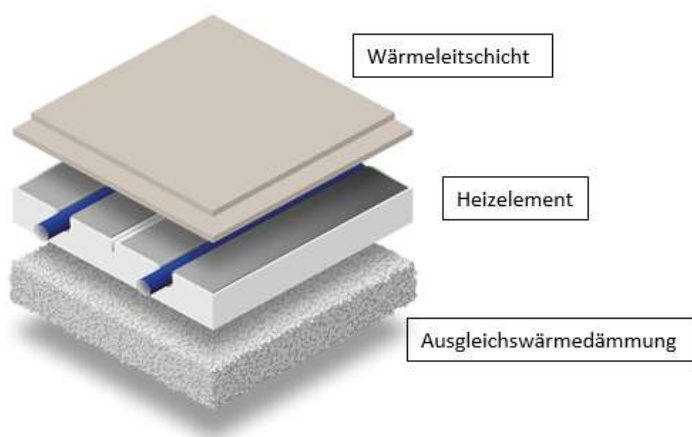


Abbildung 88: Beispielhafter Aufbau Flächenheizung CompactFloor

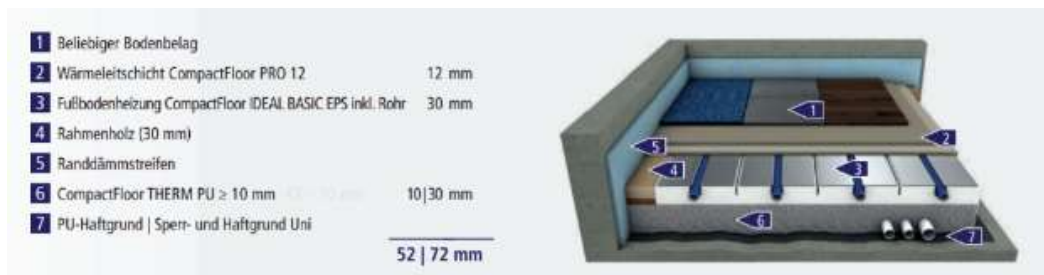
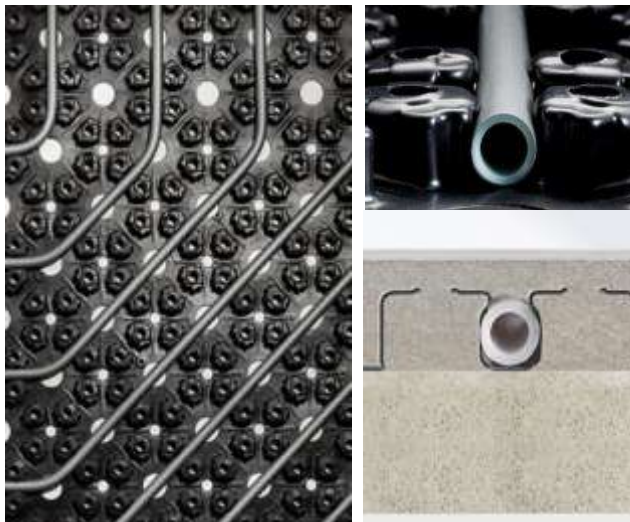


Abbildung 89: Gewählter Fußbodenaufbau CompactFloor



Ohne Vergussmaterial

Mit Vergussmaterial

Abbildung 90: Noppenelement mit eingelegten Rohren

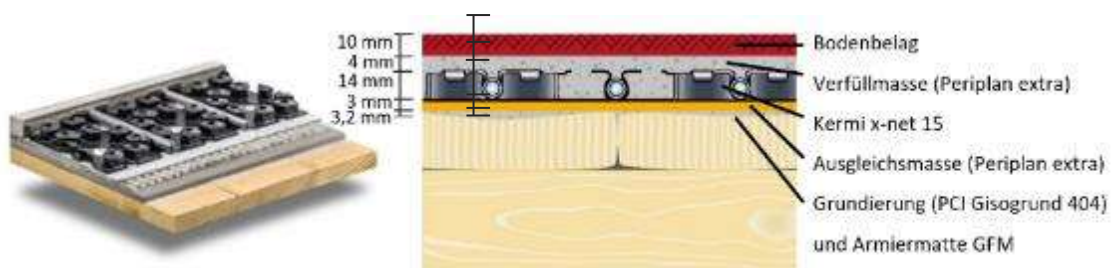


Abbildung 91: Fußbodenaufbau mit Kermi x-net C15 Dünnschichtsystem

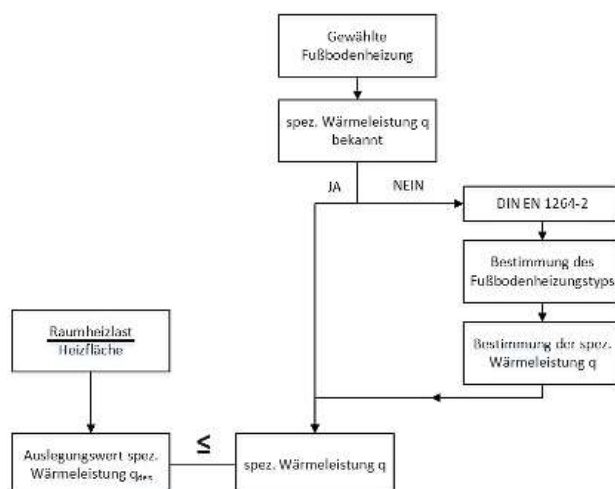


Abbildung 92: Vorgehen zur Bestimmung der passenden Fußbodenheizung

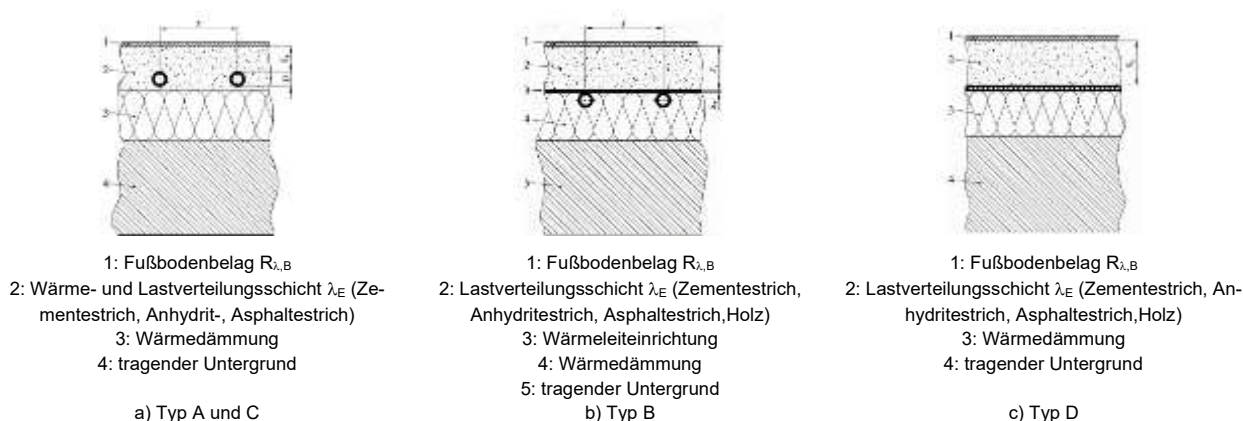


Abbildung 93: Verschiedene Systeme von Fußbodenheizungen, DIN EN 1264-2

Die zugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 17 bis Tabelle 24 gebündelt. Fachlich entscheidend ist hier die Aussage, dass die Eignung von Wärmepumpensystemen und LowEx-Konzepten unmittelbar an die reduzierte Heizlast und an die tatsächlich erreichbare Wärmeübergabe im Raum gekoppelt ist. AP 1.5 leistet damit die notwendige Verknüpfung zwischen Hüllsanierung und anlagentechnischer Umsetzbarkeit.

Tabelle 17: spezifische Auslegungsleistung [W/m^2] mit IDA ICE, Sonnenblick 6 und 8.

Spezifische Auslegungsleistung [W/m^2]	Erdgeschoss		Obergeschoss	
	Sonnenblick 6	Sonnenblick 8	Sonnenblick 6	Sonnenblick 8
Zimmer 1	69.36	69.68	80.27	80.27
Zimmer 2	29.12	29.05	42.31	42.26
Zimmer 3	81.21	81.35	72.62	72.62
Wohnküche	54.2	54.19	44.98	44.94
Spüle	69.67	69.67	47.39	47.36
WC	54.46	53.29	130.7	128.3
Flur	18.92	18.93	47.46	47.07

Tabelle 18: spezifische Auslegungsleistung [W/m^2] mit IDA ICE, Metzendorfstraße 38 ABC

Spezifische Auslegungsleistung [W/m^2]	Metzendorfstraße 38		
	A	B	C
Küche	54,9	33,29	54,77
Essbereich/Wohnzimmer	71,55	57,82	71,39
Raum 1	43,33	23,38	43,65
Raum 2	49,94	25,76	50,63
Bad	37,25	31,67	36,3
WC	132,3	149,3	134
Raum 1 DG	43,07	35,85	40,65
Raum 2 DG	41,01	45,71	40,79
EG Treppenhaus	68,39	67,96	69,62
DG Treppenhaus	39,97	40,77	43,96

Tabelle 19: Deckung der spez. Auslegungsleistung [W/m²] mit CompactFloor, Sonnenblick 6 und 8

Spezifische Auslegungsleistung [W/m²]	Erdgeschoss		Obergeschoss	
Raum	Sonnenblick 6	Sonnenblick 8	Sonnenblick 6	Sonnenblick 8
Zimmer 1	69,36	69,68	80,27	80,27
Zimmer 2	29,12	29,05	42,31	42,26
Zimmer 3	81,21	81,35	72,62	72,62
Wohnküche	54,2	54,19	44,98	44,94
Spüle	69,67	69,67	47,39	47,36
WC	54,46	53,29	130,7	128,3
Flur	18,92	18,93	47,46	47,07

Tabelle 20: Deckung der spez. Auslegungsleistung [W/m²] mit CompactFloor, Metzendorfstraße 38 ABC.

Spezifische Auslegungsleistung [W/m²]	Metzendorfstraße 38		
Raum	A	B	C
Küche	54,9	33,29	54,77
Essbereich/Wohnzimmer	71,55	57,82	71,39
Raum 1	43,33	23,38	43,65
Raum 2	49,94	25,76	50,63
Bad	37,25	31,67	36,3
WC	132,3	149,3	134
Raum 1 DG	43,07	35,85	40,65
Raum 2 DG	41,01	45,71	40,79
EG Treppenhaus	68,39	67,96	69,62
DG Treppenhaus	39,97	40,77	43,96

Tabelle 21: Deckung der spez. Auslegungsleistung [W/m²] mit Kermi, Sonnenblick 6 und 8

Spezifische Auslegungsleistung [W/m²]	Erdgeschoss		Obergeschoss	
Raum	Sonnenblick 6	Sonnenblick 8	Sonnenblick 6	Sonnenblick 8
Zimmer 1	69,36	69,68	80,27	80,27
Zimmer 2	29,12	29,05	42,31	42,26
Zimmer 3	81,21	81,35	72,62	72,62
Wohnküche	54,2	54,19	44,98	44,94
Spüle	69,67	69,67	47,39	47,36
WC	54,46	53,29	130,7	128,3
Flur	18,92	18,93	47,46	47,07

Tabelle 22: Deckung der spez. Auslegungsleistung [W/m²] mit Kermi, Metzendorfstraße 38 ABC

Spezifische Auslegungsleistung [W/m²]	Metzendorfstraße 38		
Raum	A	B	C
Küche	54,9	33,29	54,77
Essbereich/Wohnzimmer	71,55	57,82	71,39
Raum 1	43,33	23,38	43,65
Raum 2	49,94	25,76	50,63
Bad	37,25	31,67	36,3

WC	132,3	149,3	134
Raum 1 DG	43,07	35,85	40,65
Raum 2 DG	41,01	45,71	40,79
EG Treppenhaus	68,39	67,96	69,62
DG Treppenhaus	39,97	40,77	43,96

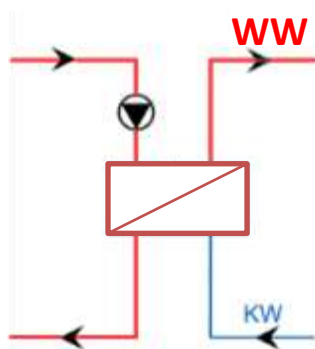
Tabelle 23: Ausgewählte Heizkörper Metzendorfstraße 38 ABC

Raum	$\dot{Q}_{\text{Betrieb}}$ [W]	Erforderlich $\dot{Q}_{\text{Norm}}$ [W]	Kermi therm- X2 Profil-K Bauhöhe X Baulänge [83]	Gewählt $\dot{Q}_{\text{Norm}}$ [W]
WC A	202	1399	Typ 33 900 X 500	1512
WC B	227	1577	Typ 22 900 X 700	1607
WC C	200	1388	Typ 33 900 X 500	1512
EG Treppenhaus A	528	3668	Typ 33 900 X 1300	3930
EG Treppenhaus B	541	3757	Typ 33 900 X 1300	3930
EG Treppenhaus C	533	3704	Typ 33 900 X 1300	3930
DG Treppenhaus A	296	2057	Typ 22 900 X 900	2066
DG Treppenhaus B	311	2162	Typ 22 900 X 1000	2295
DG Treppenhaus C	283	1965	Typ 22 900 X 900	2066

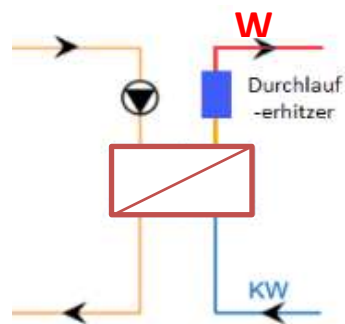
Tabelle 24: Ausgewählte Heizkörper Sonnenblick 6 und 8

Raum	$\dot{Q}_{\text{Betrieb}}$ [W]	Erforderlich $\dot{Q}_{\text{Norm}}$ [W]	Kermi therm- X2 Profil-K Bauhöhe X Baulänge [83]	Gewählt $\dot{Q}_{\text{Norm}}$ [W]
OG WC 6	220	1527	Typ 22 900 X 700	1607
OG WC 8	216	1499	Typ 22 900 X 700	1607

Im Bereich der Wärmeerzeugung und Trinkwarmwasserbereitung wurden die Gebäude nicht isoliert als Hülle betrachtet, sondern als System mit konkreten anlagentechnischen Optionen. Dies zeigen Abbildung 94 bis Abbildung 103.



a) Frischwasserstation



b) Frischwasserstation mit Durchlauferhitzer

Abbildung 94: Schematische Darstellung Frischwasserstation und Frischwasserstation mit Durchlauferhitzer

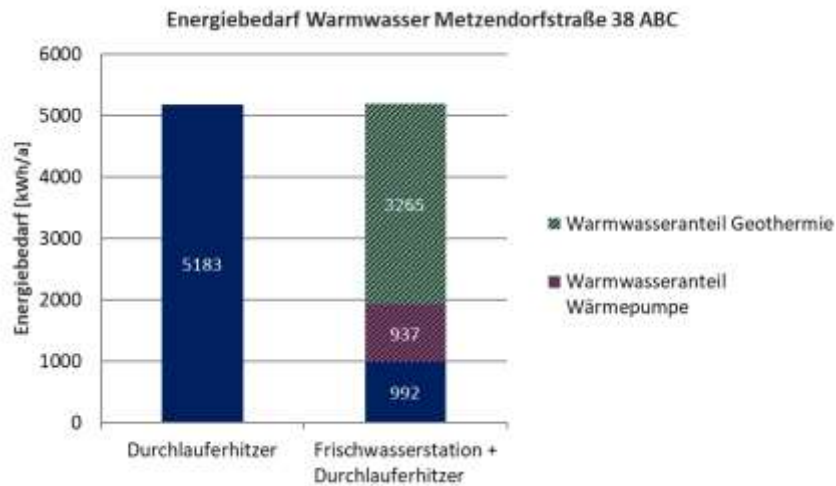


Abbildung 95: Energiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitung Metzendorfstraße 38 ABC

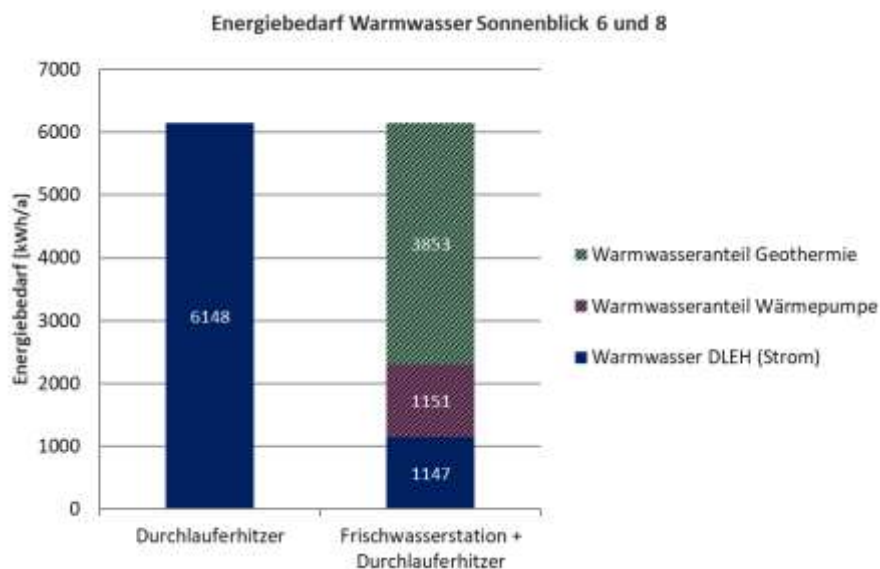
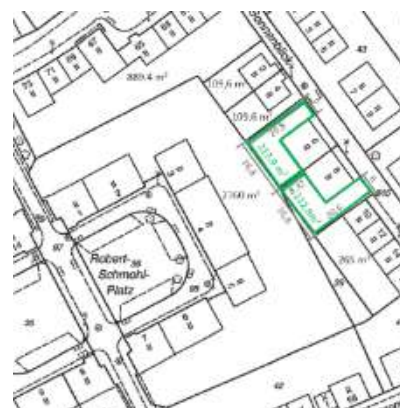


Abbildung 96: Energiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitung Sonnenblick 6 und 8



a) Bemaßung des Gartens der Metzendorfstraße 38 ABC, Gartenfläche der umliegenden Gebäude

b) Bemaßung des Gartens der Sonnenblick 6 und 8, Gartenfläche der umliegenden Gebäude

Abbildung 97: Bemaßung der Gartenflächen

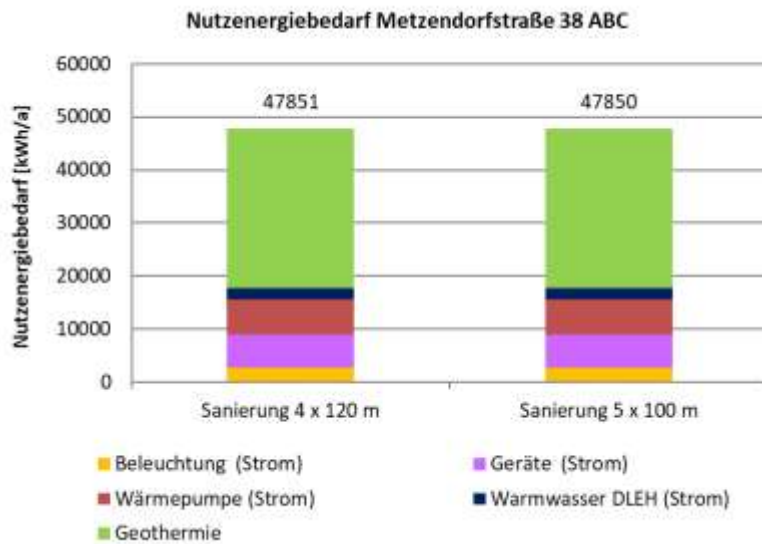


Abbildung 98: Nutzenergiebedarf mit vier (links) und fünf (rechts) Erdwärmesonden, Metzendorfstraße 38 ABC

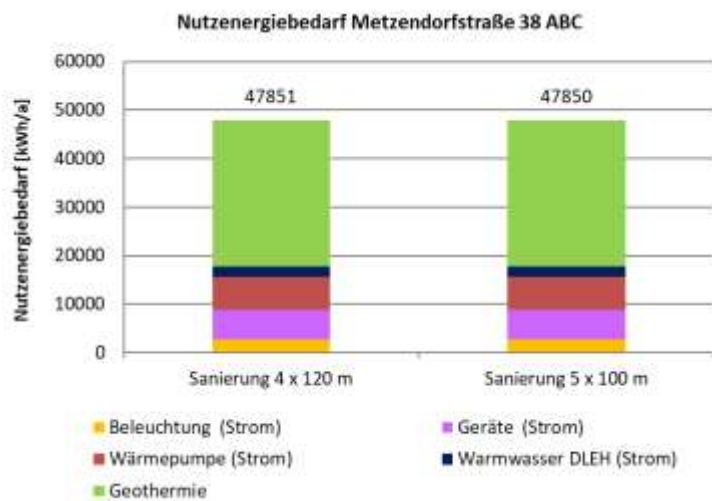


Abbildung 99: Nutzenergiebedarf mit vier (links) und fünf (rechts) Erdwärmesonden, Sonnenblick 6 + 8

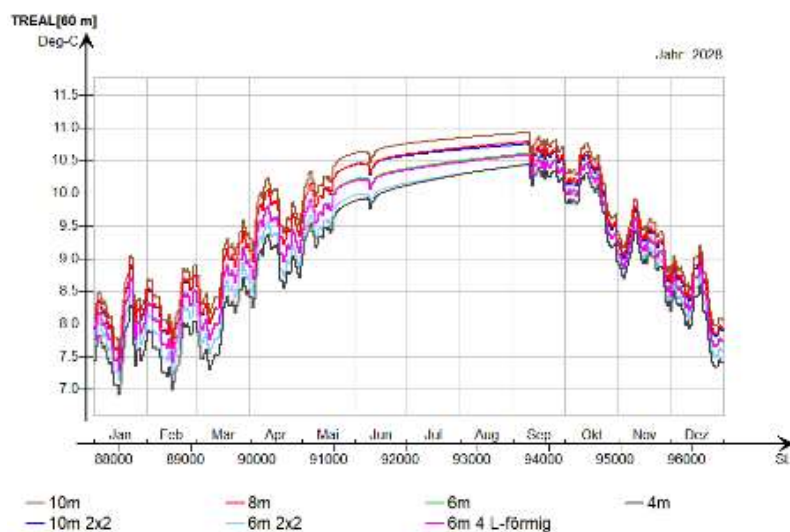


Abbildung 100: Tagesmittelwerte der Erdreichtemperatur in 60 m Tiefe im elften Simulationsjahr

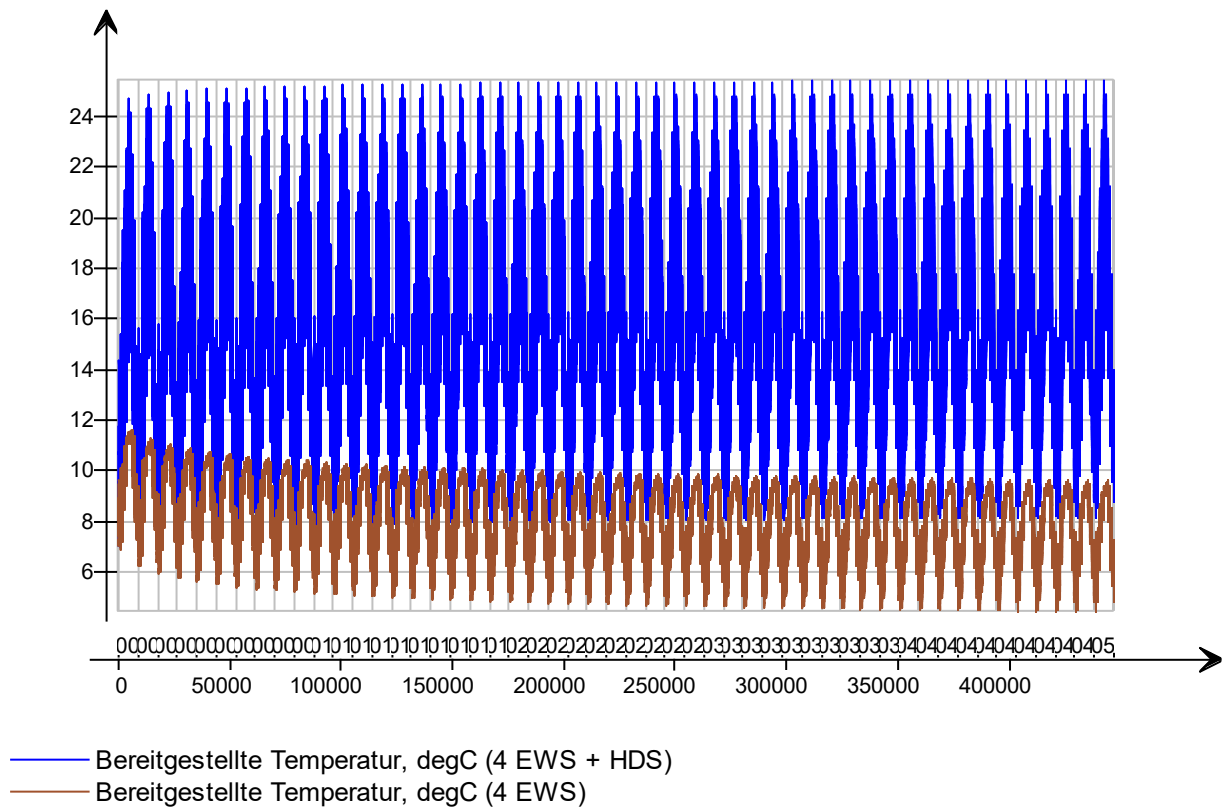


Abbildung 101: Bereitgestellte Temperatur mit und ohne Regeneration in einem Simulationszeitraum von 50 Jahre

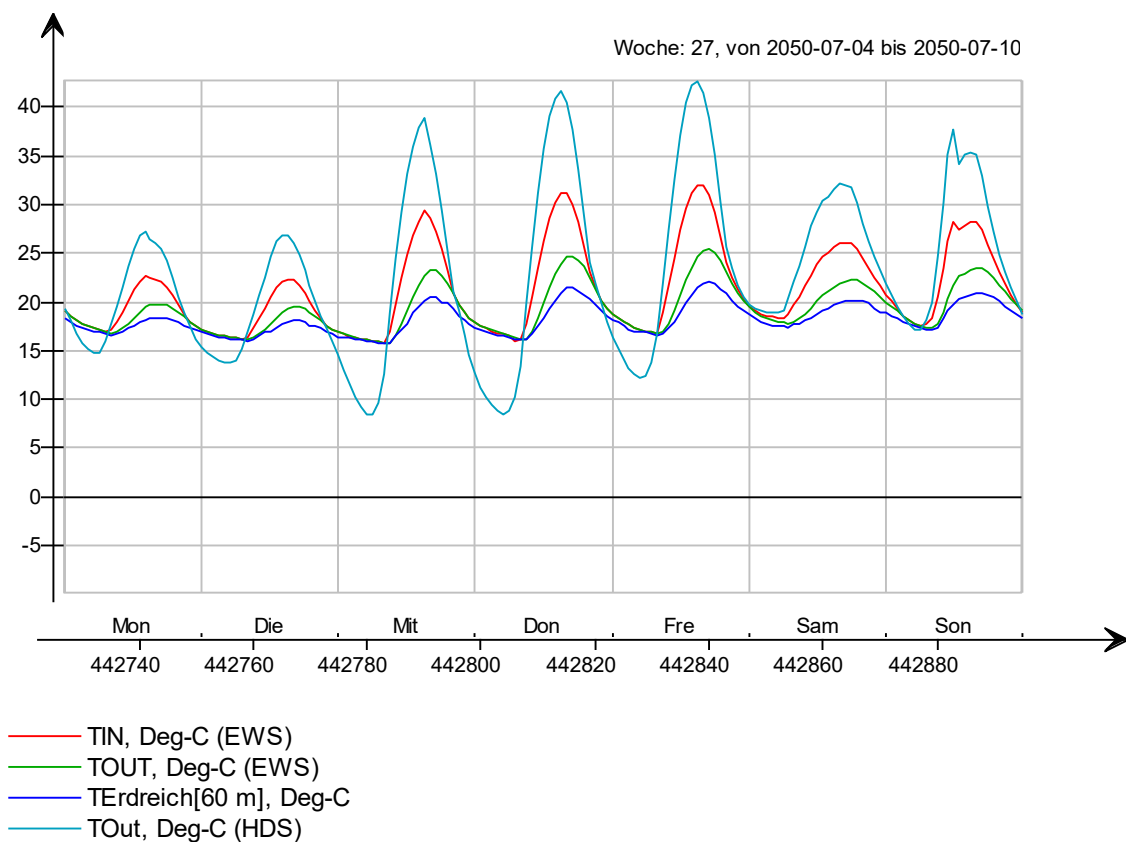


Abbildung 102: Vor- und Rücklauf der Erdwärmesonde, Erdreichtemperatur in 60 m Tiefe, bereitgestellte Temperatur der Hybriddachsteine, Temperaturverlauf über eine Woche im Juli nach 50 Jahren

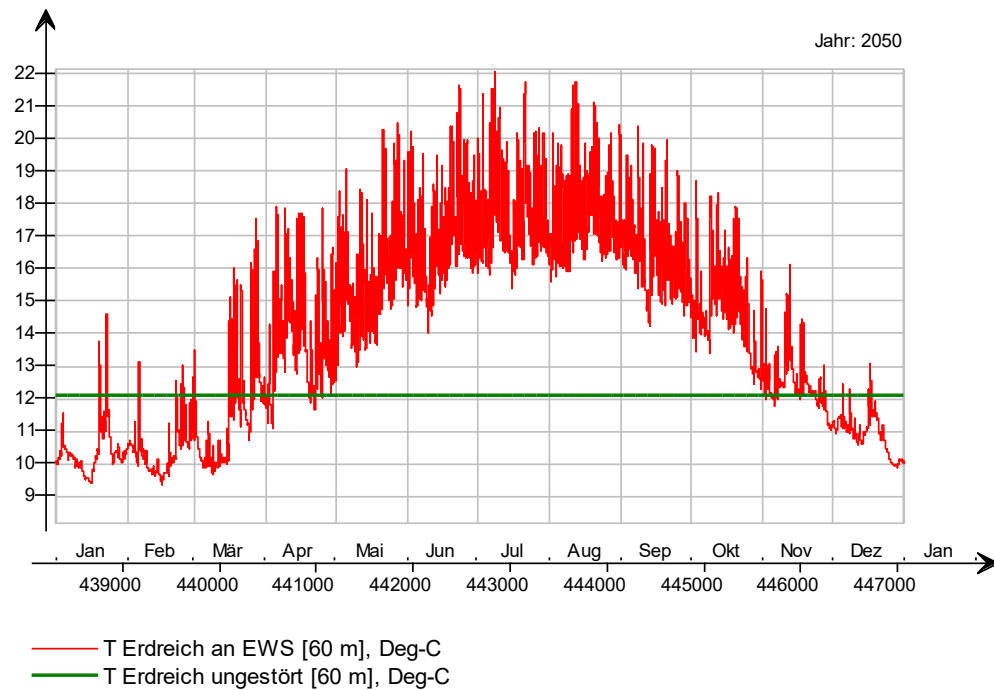


Abbildung 103: Ungestörte und durch Erdwärmesonden und Regeneration beeinflusste Erdreichtemperatur nach 50 Simulationsjahren **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabellenbezogen werden die anlagentechnischen Konsequenzen in Tabelle 23 bis Tabelle 26 zusammengeführt. Die wesentliche Erkenntnis besteht darin, dass die Wärmepumpenauslegung nicht losgelöst von Grundstücksrandbedingungen, Quelltemperaturen, Regenerationsstrategien und dem Warmwasserbedarf betrachtet werden kann. Damit wird aus AP 1.5 heraus bereits eine klare Systemperspektive sichtbar.

Tabelle 25: Erforderliche Wärmepumpleistungen der verschiedenen Varianten

Variante	Metzendorfstraße 38 ABC		Sonnenblick 6 und 8	
	$\dot{Q}_{H,Ges}$ [kW]	$\dot{Q}_{WP,erf}$ [kW]	$\dot{Q}_{H,Ges}$ [kW]	$\dot{Q}_{WP,erf}$ [kW]
Saniert mit Heizkörpern	25,4	27,7	25	27,3
Saniert mit Fußbodenheizung	19,7	21,5	19,7	21,5

Tabelle 26: Technische Daten der gewählten Wärmepumpen

Leistungsdaten/ Einsatzgrenzen	Saniert mit FBH	Saniert mit HK
	SW 232H3	SW 302H3
Heizleistung bei B0W35	22,35	29,6
COP bei B0W35	4,95	4,88
Wärmequellenrücklauf min./max.	-5/25	-5/25

Tabelle 27: Flächenbedarf der Entzugsmittel und vorhandene unversiegelte Fläche

Flächen	Metzendorfstr. 38 ABC HK & WW	Sonnenblick 6, 8 HK & WW	Metzendorfstr. 38 ABC FBH	Sonnenblick 6, 8 FBH
Verfügbare, unversiegelte Fläche	25 x 7,8 m 195 m ²	33,5 x 8,3 m 427 m ²	25 x 7,8 m 195 m ²	33,5 x 8,3 m 427 m ²
Horizontale Kollektoren	861 m ²	826 m ²	501 m ²	501 m ²
Erdwärmekörbe	Ca. 790 m ²	Ca. 760 m ²	Ca. 440 m ²	Ca. 440 m ²
Erdsonden	24 m o. 25 m ²	24 m o. 25 m ²	18 m o. 25 m ²	18 m o. 25 m ²

Tabelle 28: Gewählte Anlagentechnik

Variante	Metzendorfstraße 38 ABC/ Sonnenblick 6 und 8 HK & WW	Metzendorfstraße 38 ABC/ Sonnenblick 6 und 8 FBH
Heizlast	25,4 kW/ 25 kW	19,7 kW
Wärmepumpe	SW 302 H3: 29,6 kW	SW 232 H3: 22,35 kW
Warmwasser	Trinkwasserstation	Durchlauferhitzer
Erdsonden	5 EWS je 150 m Abstand: 6 m/ 8 m	4 EWS je 120 m Abstand: 8 m/ 10 m

Die eigentliche Systemsimulation der Varianten und die daraus ableitbaren energetischen Kernaussagen werden über Abbildung 104 bis Abbildung 107 eingeführt. Die Ergebnisse selbst sind in Abbildung 108 bis Abbildung 113 dargestellt.

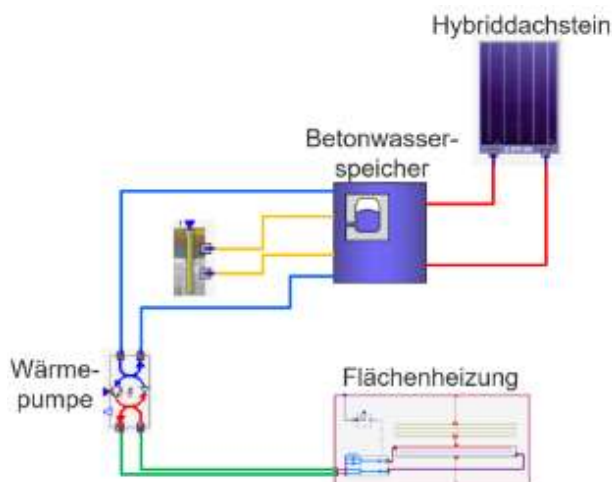


Abbildung 104: Entwurf des Anlagenschemas für die Anbindung der Komponenten an einen Speicher

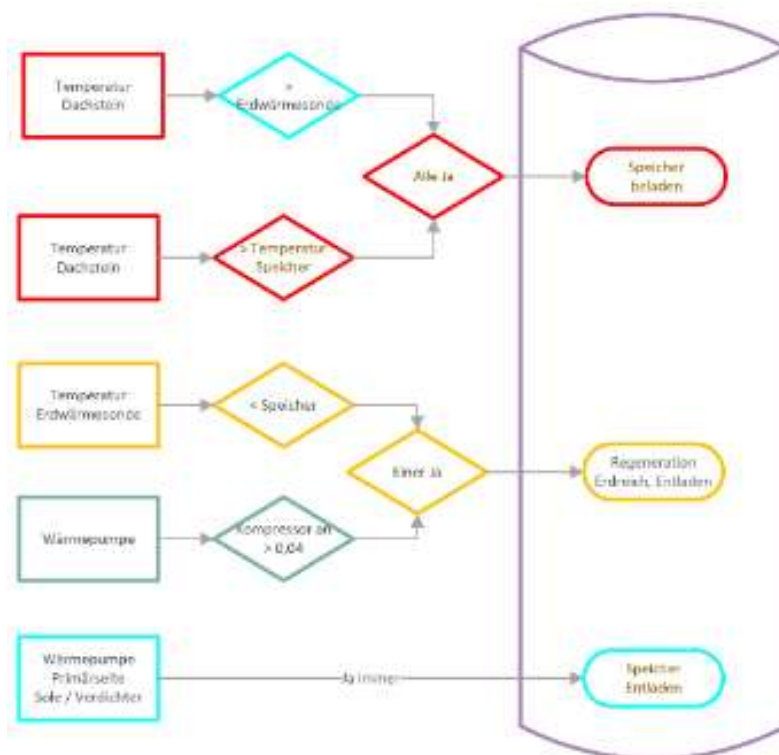


Abbildung 105: Regelungskonzept

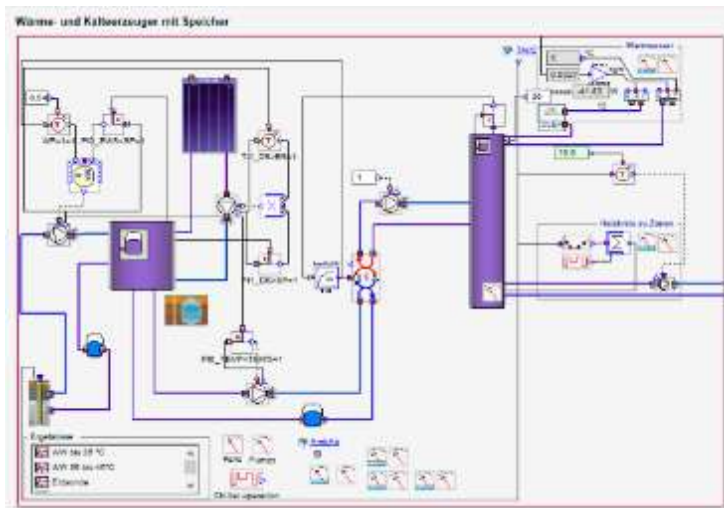


Abbildung 106: Anlagenschema in IDA ICE

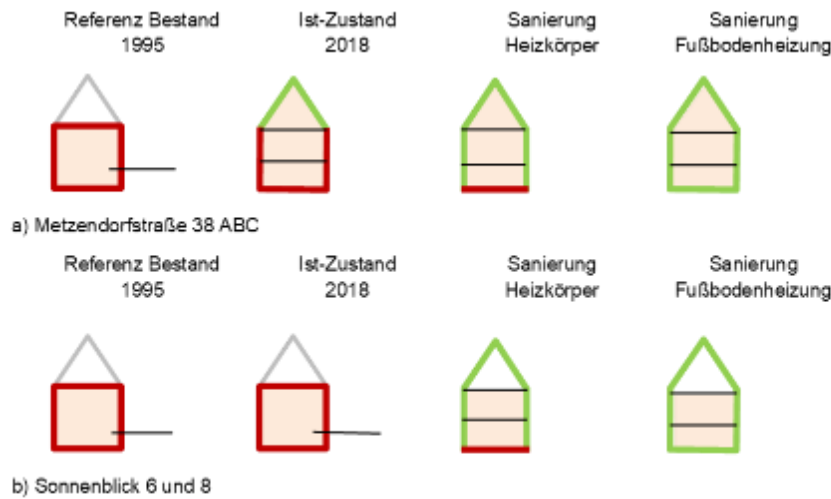


Abbildung 107: Übersicht der simulierten Varianten

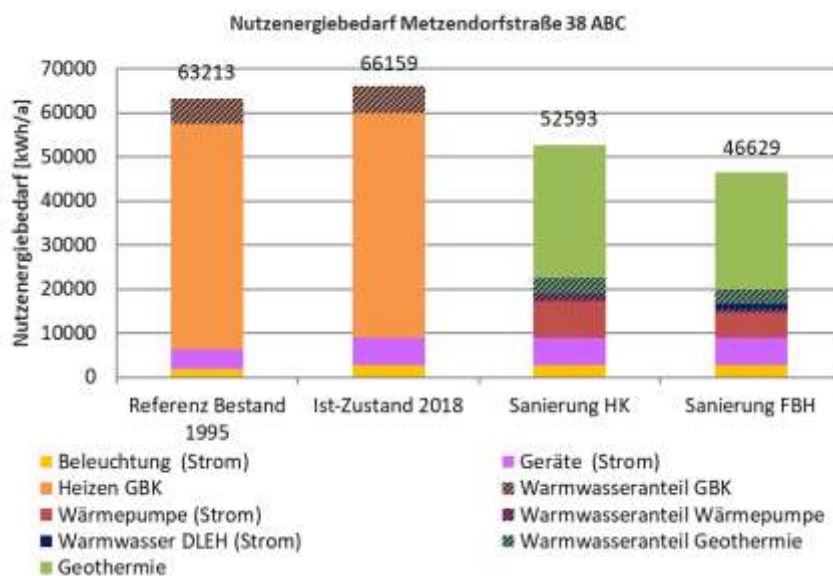


Abbildung 108: Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Metzendorfstraße 38 ABC

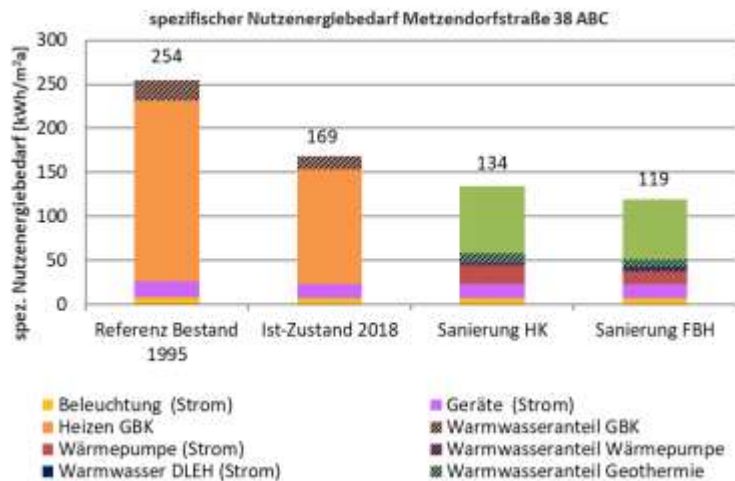


Abbildung 109: spezifischer Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Metzendorfstraße 38 ABC

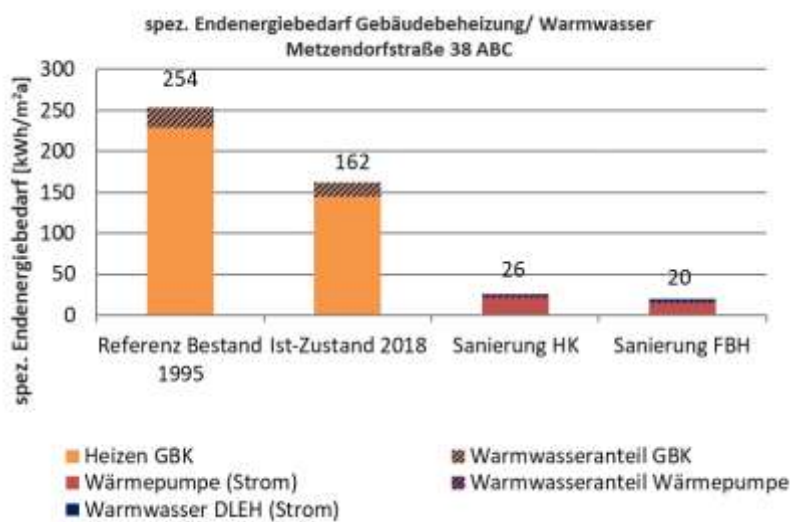


Abbildung 110: Spezifischer Endenergiebedarf zur Gebäudebeheizung und Trinkwasserbereitung

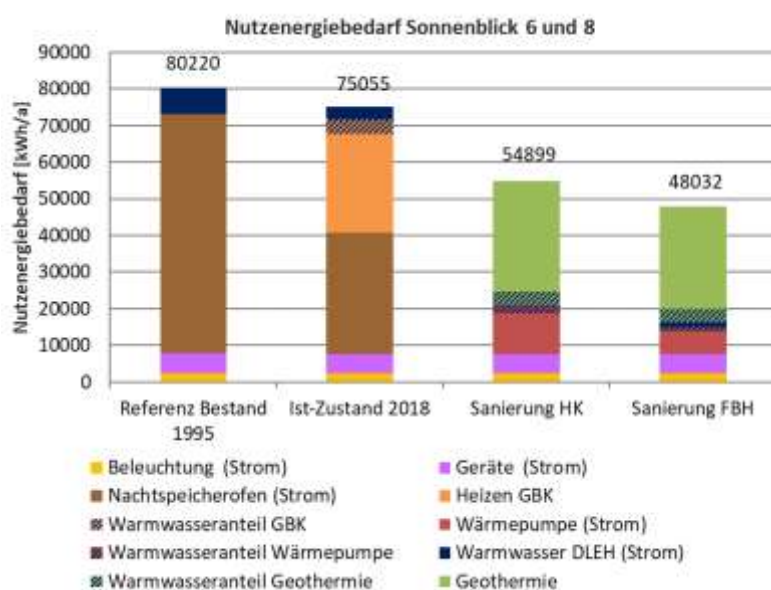


Abbildung 111: Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Sonnenblick 6 und 8

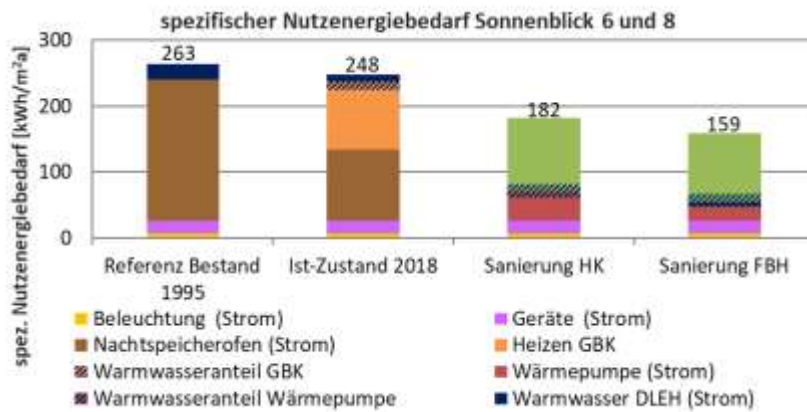


Abbildung 112: Spezifischer Nutzenergiebedarf der Simulationsvarianten Sonnenblick 6 und 8

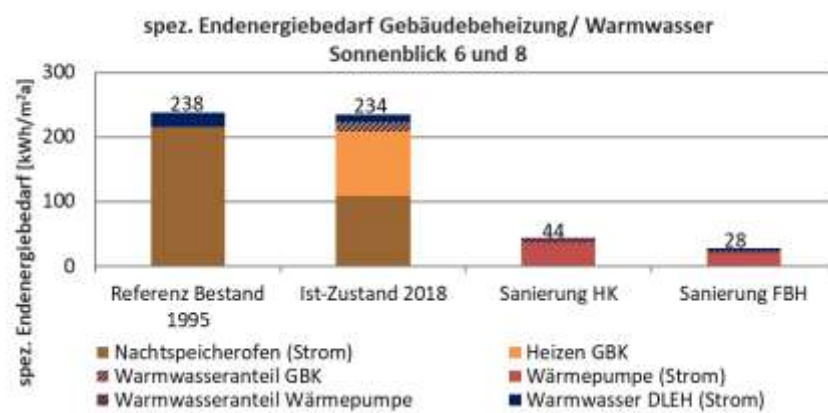


Abbildung 113: Spezifischer Endenergiebedarf zur Gebäudebeheizung und Trinkwasserbereitung

Diese werden durch Tabelle 29 bis Tabelle 33 ergänzt.

Tabelle 29: Zusammenfassung Eingabedaten und Energiebedarf Metzendorfstraße 38 ABC

Flächen	Referenz Be- stand 1995	Ist-Zustand 2018	Sanierung HK	Sanierung FBH
Beheizte Fläche [m²]	249	393	393	393
Belegungsanzahl [Personen] (VDI 6002-1)	9,3	10,2	10,2	10,2
Max. Vorlauftemperatur[°C]	70	70	45	35
Warmwasser [°C]	60	60	45	45
Beleuchtung+Geräte [kWh]	6400	8900	8900	8900
Wärmeerzeuger Heizen [kWh]	51070	51090	8500	6704
Wärmeerzeuger WW [kWh]	5760	6180	1560	Entkoppelt: 940
Wärmeerzeuger gesamt [kWh]	56830	57270	10060	8020
Erdwärme gesamt [kWh]	-	-	33640	30050
Gesamtenergie [kWh]	63230	66170	52600	46970

Tabelle 30: Zusammenfassung Eingabedaten und Energiebedarf Sonnenblick 6 und 8

Flächen	Referenz Be- stand 1995	Ist-Zustand 2018	Sanierung HK	Sanierung FBH
Beheizte Fläche [m ²]	304	302	302	302
Belegungsanzahl [Personen] (VDI 6002-1)	11,2	11,8	11,8	11,8
Max. Vorlauftemperatur[°C]	-	70	60	35
Warmwasser [°C]	60	60	45	45
Beleuchtung+Geräte [kWh]	7750	7700	7700	7700
Wärmeerzeuger Heizen [kWh]	65480	60070	10950	7340
Wärmeerzeuger WW [kWh]	6990	7280	2400	Entkoppelt: 1150
Wärmeerzeuger gesamt [kWh]	72470	67350	13350	8490
Erdwärme gesamt [kWh]	-	-	33850	31830
Gesamtenergie [kWh]	80220	75050	54900	48020

Tabelle 31: Benötigte Heizleistung/ spezifische Heizleistung der Wärmeverbraucher zum Erreichen der Solltemperatur.

Raum	Solltemperatur [°C]	Heizkörper Leistung [W]	Fußbodenheizung spez. Leistung [W/m ²]
DG Zimmer	21	727	49
DG Bodenraum	21	3831	42
DG Treppenhaus	17	28	7
OG Treppenhaus	17	0	0
EG Treppenhaus	17	317	41

Tabelle 32: Auslegung der Varianten mit beheiztem Dachgeschoss.

Variante	Auslegung: Heizkörpern	Auslegung: Fußbodenheizung
Warmwasser	Trinkwasserstation	Durchlauferhitzer
Heizlast $\dot{Q}_{AP}$	30,16 kW	24,8 kW
Erforderliche Wärmepumpenleistung $\dot{Q}_{WP,erf}$	32,9 kW	27 kW
Gewählte Wärmepumpe	Vitocal 350 G Typ BW 351.B33 (Viessmann)	SW 302 H3 (alpha innotec)
Heizleistung Wärmepumpe P_{HZG}	32,9 kW	29,6 kW
Jahresarbeitszahl SCOP	4,85	4,0
Wärmepumpenverdampferleistung P_{ENT}	24,7 kW	23,5 kW
Anzahl n_{EWS}	5	5
Spezifische Entzugsleistung P_{EWS}	31 W/m	36 W/m
Länge einer Erdwärmesonde l_{EWS}	159, 4 m	130,6 m
Erdsonden zusammengefasst	5 EWS je 160 m Abstand: 8 m	5 EWS je 130 m Abstand: 8 m

Tabelle 33: Zusammenfassung der Anlagentechnik der Umsetzungsempfehlungen.

Variante	Metzendorfstraße 38 ABC	Sonnenblick 6 und 8	Sonnenblick 6 und 8 mit Dachgeschoss
Wärmeverbraucher	Fußbodenheizung (VL _{max} 35 °C)		
Warmwasser	Kombiniert: Frischwasserstation mit Durchlauferhitzer		
Wärmepumpe	SW 232 H3: 22,35 kW	SW 232 H3: 22,35 kW	SW 302 H3: 29,6 kW
Erdsonden	5 EWS je 100m Abstand: 6 m	5 EWS je 100 m Abstand: 8 m	5 EWS je 130 m Abstand: 8 m

In der Gesamtschau zeigen die Analysen, dass erst das Zusammenführen von Hüllstandard, Wärmeübergabe und Wärmeerzeugung eine belastbare Aussage zum Endenergiebedarf erlaubt. Genau hierin liegt der Mehrwert von AP 1.5 gegenüber einer rein bauteilorientierten oder rein bilanziellen Betrachtung.

Ein eigenständiger Untersuchungskomplex befasst sich mit der Frage des beheizten bzw. unbeheizten Dachgeschosses. Diese Fragestellung ist für den denkmalgeschützten Bestand besonders relevant, weil Dachräume, Ausbaustände und Nutzungsgrenzen erheblichen Einfluss auf Heizlast, Raumtemperaturverteilung und Anlagenauslegung haben. Die Auswertungen werden über Abbildung 114 bis Abbildung 116 nachvollziehbar.

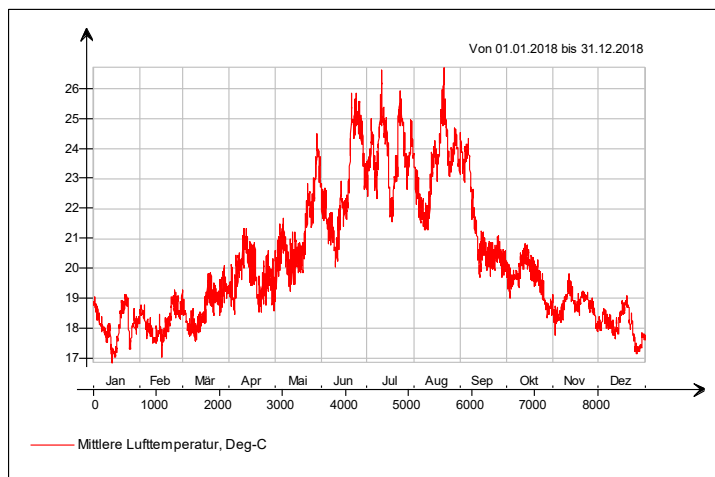


Abbildung 114: Innenraumtemperatur Dachgeschosstreppenhauszone Sonnenblick 6 mit Heizkörper

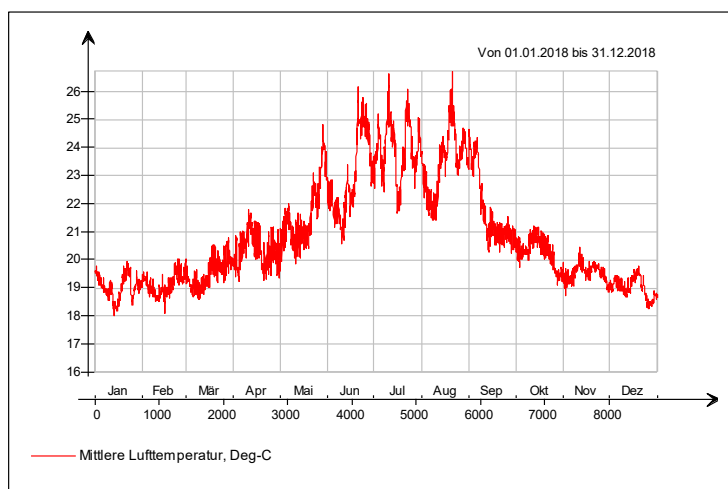


Abbildung 115: Innenraumtemperatur Dachgeschosstreppenhauszone Sonnenblick 6 mit Fußbodenheizung

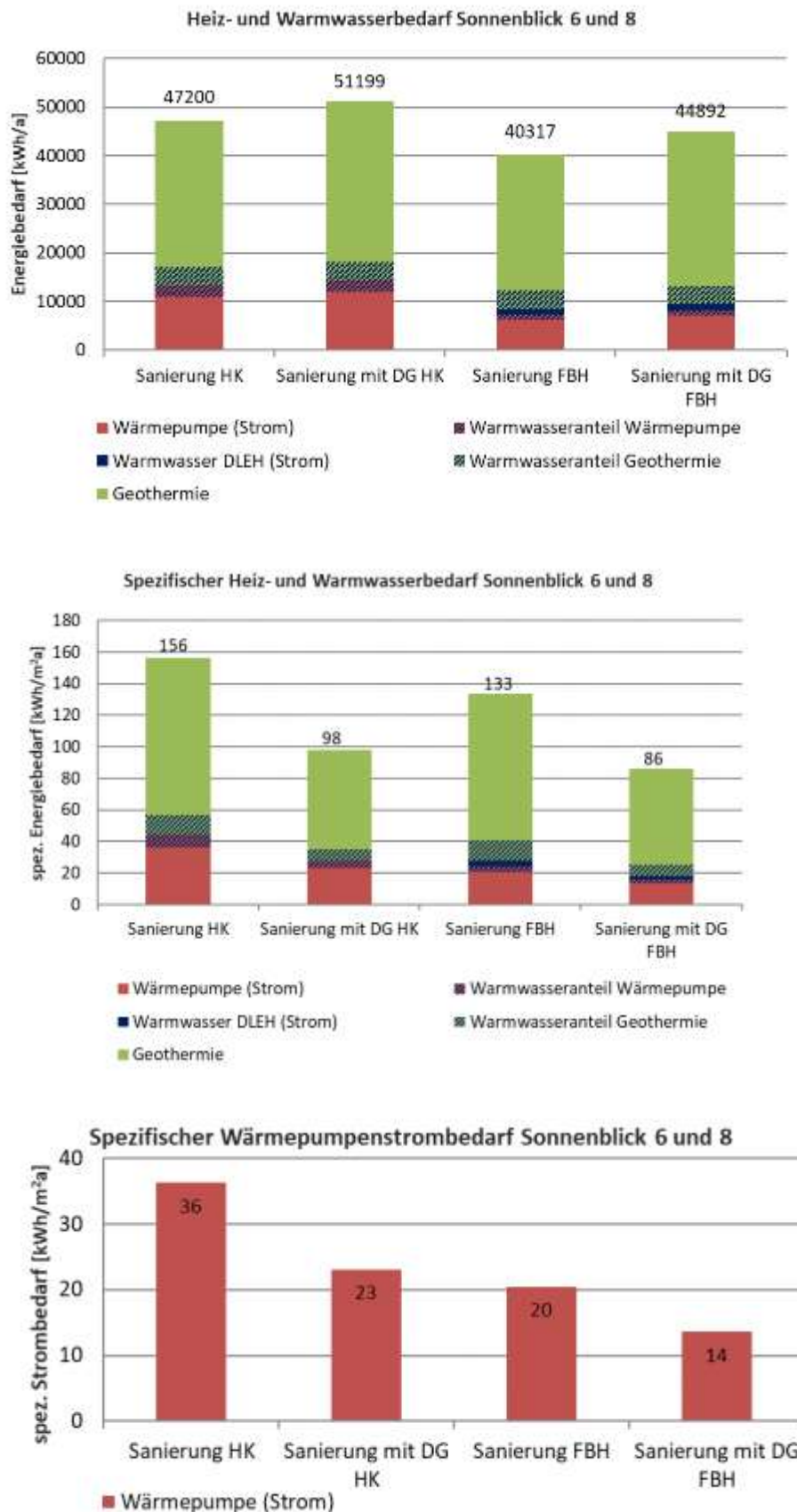


Abbildung 116: Spezifischer Strombedarf der Wärmepumpe der verschiedenen Sanierungsvarianten de

Für die Bewertung bedeutet dies, dass Nutzungsentscheidungen im Dachraum nicht als nachgeordnetes Detail, sondern als energetisch und anlagentechnisch relevante Systementscheidung verstanden werden müssen.

Die hohe zeitliche Auflösung der Simulation wird in den Lastgängen und Jahresverläufen sichtbar. Dies zeigen Abbildung 117 bis Abbildung 122.

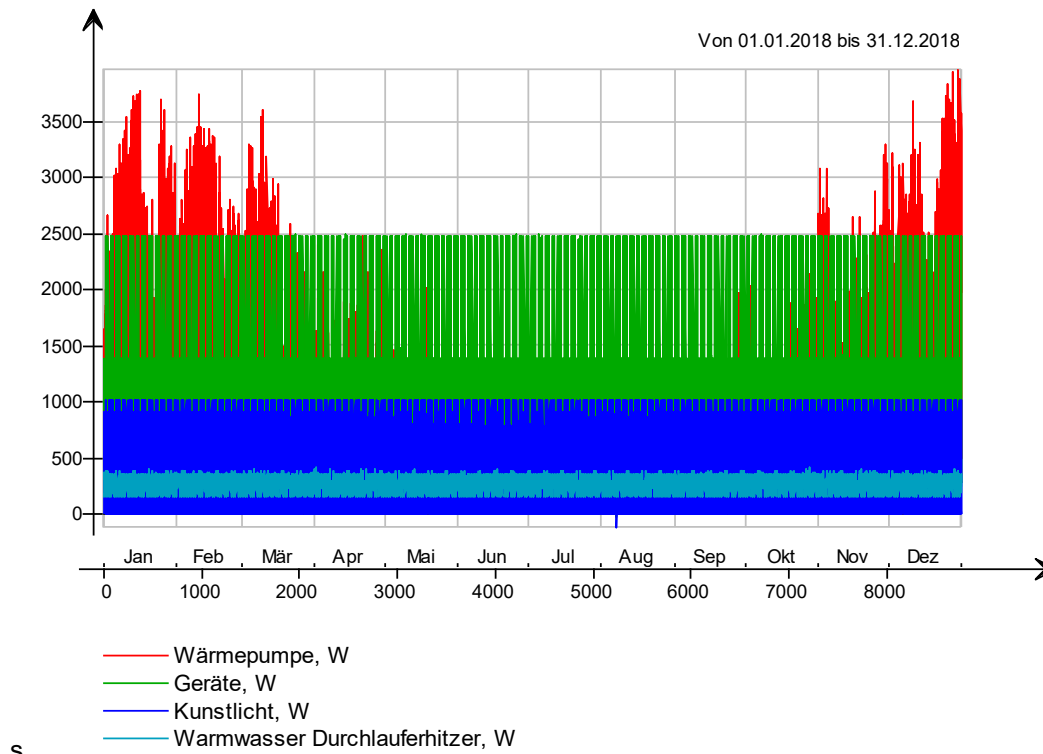


Abbildung 117: Endenergiebedarfsverlauf über ein Jahr, Metzendorfstraße 38 ABC

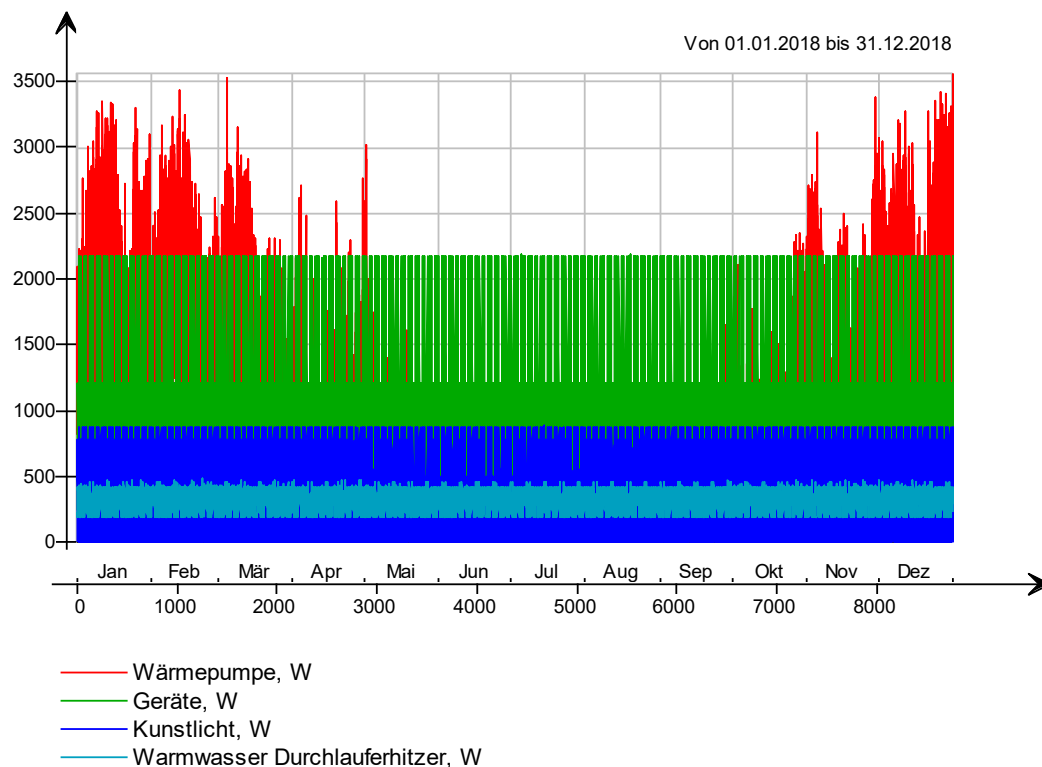


Abbildung 118: Endenergiebedarfsverlauf über ein Jahr, Sonnenblick 6 und 8

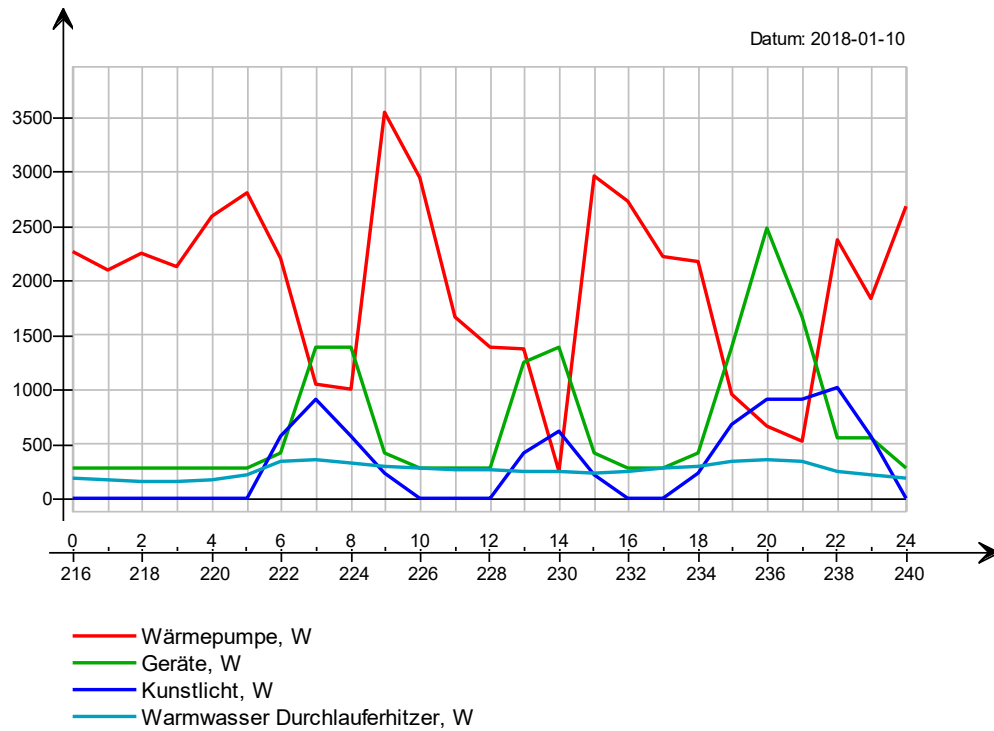


Abbildung 119: Endenergiebedarfsverlauf über einen Tag im Januar, Metzendorfstraße 38 ABC

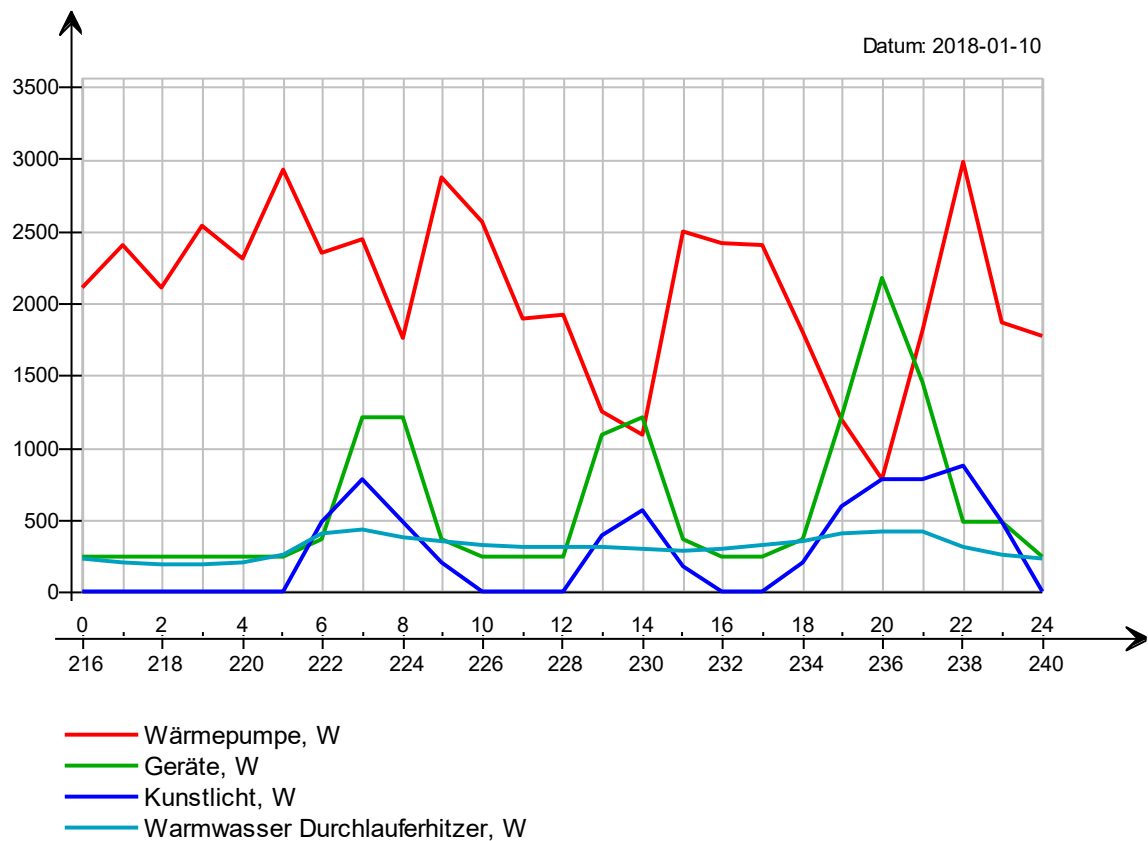


Abbildung 120: Endenergiebedarfsverlauf über einen Tag im Januar, Sonnenblick 6 und 8

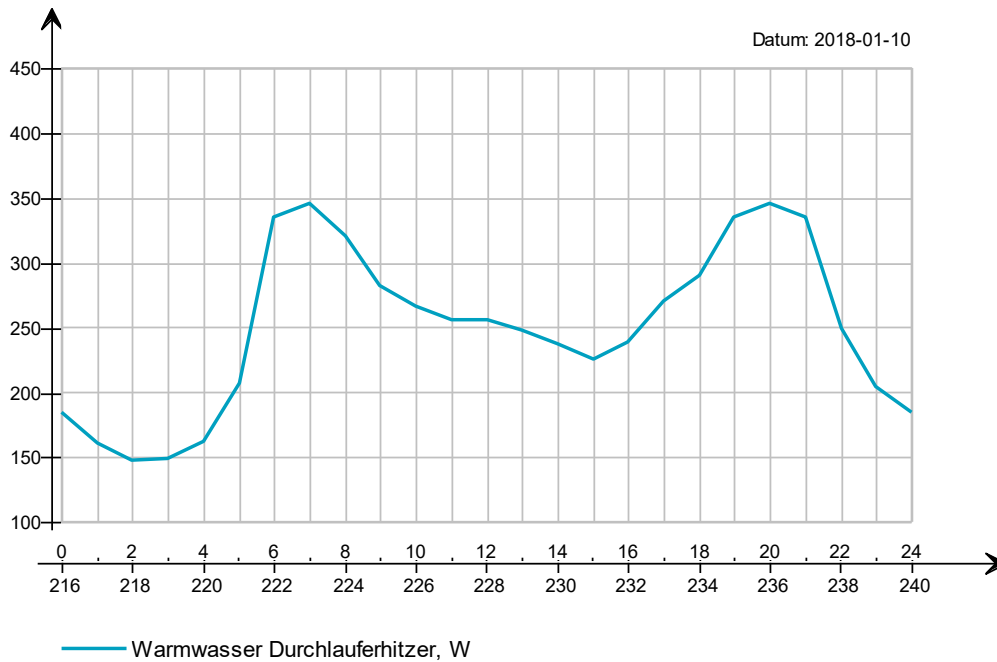


Abbildung 121: Endenergiebedarfsverlauf des Durchlauferhitzers über einen Tag im Januar, Metzendorfstraße 38 ABC

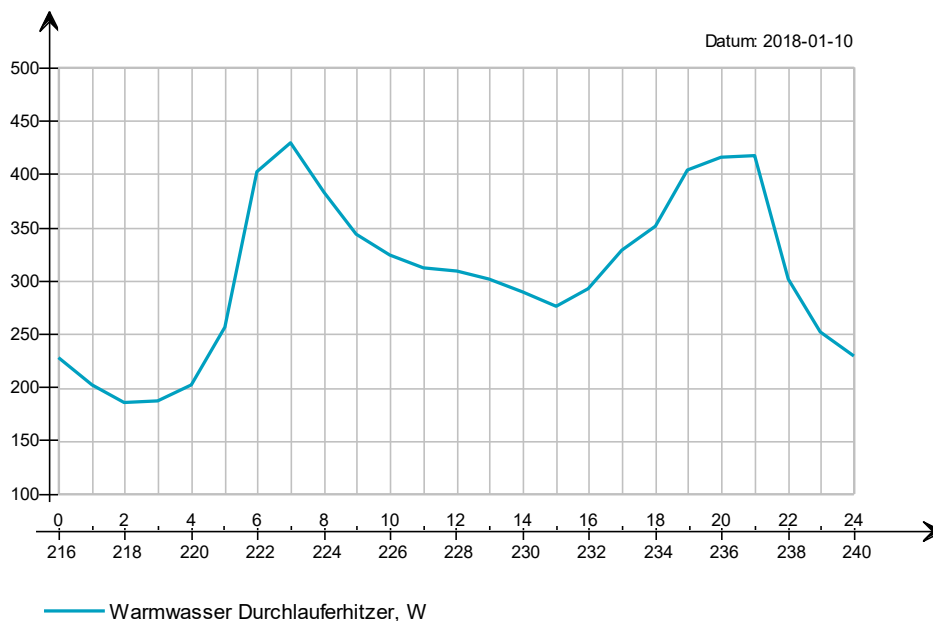


Abbildung 122: Endenergiebedarfsverlauf des Durchlauferhitzers über einen Tag im Januar, Sonnenblick 6 und 8

Gerade diese Darstellungen sind für die Systemintegration bedeutsam, da sie zeigen, dass die energetische Bewertung nicht bei Jahreskennwerten stehenbleiben darf. Für die Einbindung von Wärmepumpen, Speichern und gegebenenfalls regenerativer Stromerzeugung ist die Kenntnis zeitlich aufgelöster Lastprofile von zentraler Bedeutung. AP 1.5 liefert damit zugleich die Datengrundlage für nachfolgende anlagentechnische und quartiersbezogene Betrachtungen.

Ergänzend hierzu wurden die Wechselwirkungen zwischen Entzugsquelle, Regeneration und elektrischem System detailliert untersucht. Die entsprechenden Ergebnisse werden in Abbildung 123 bis Abbildung 132 dargestellt.

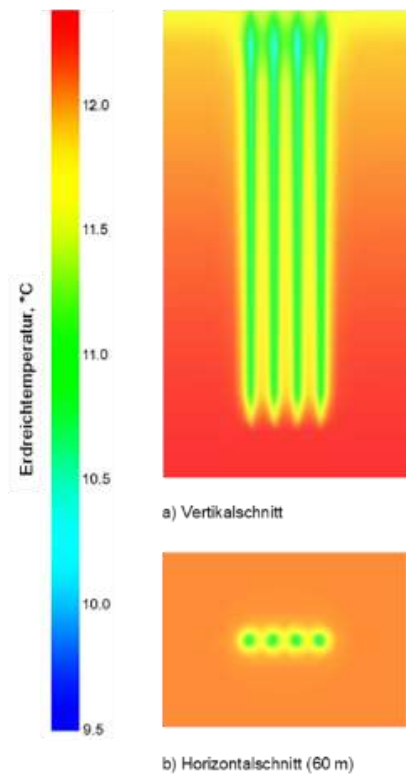


Abbildung 123: Februar 2018, Erdreichtemperaturverlauf

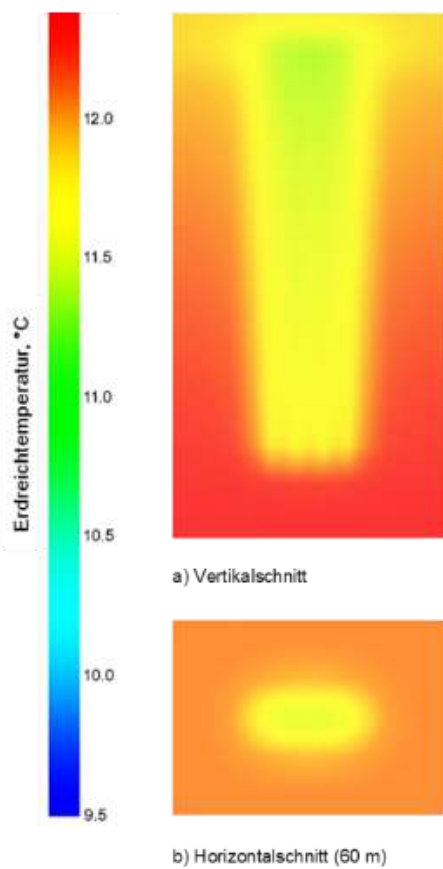


Abbildung 124: August 2018, Erdreichtemperaturverlauf

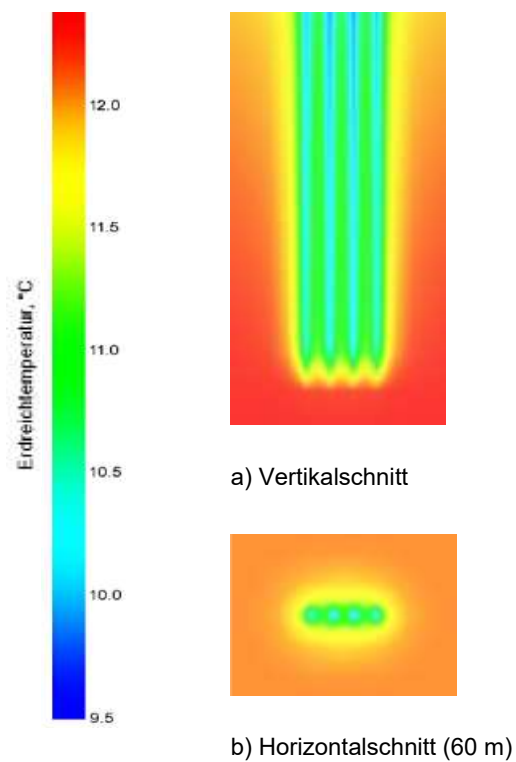


Abbildung 125: Februar 2019, Erdreichtemperaturverlauf

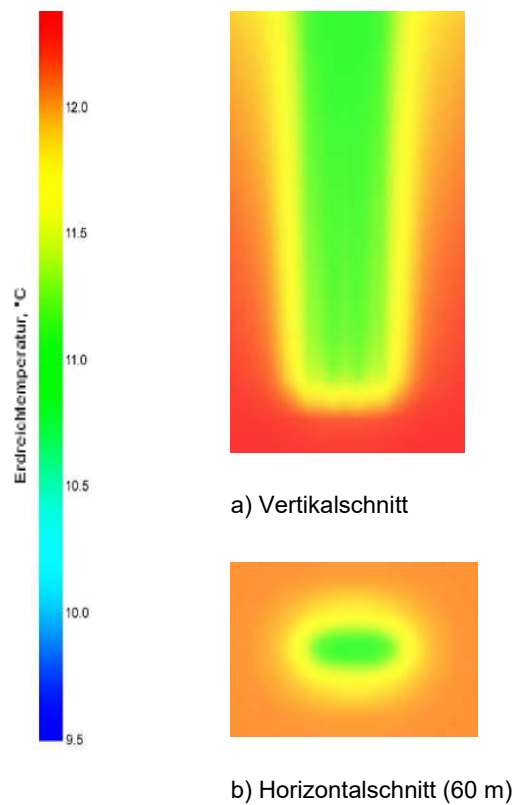


Abbildung 126: August 2019, Erdreichtemperaturverlauf

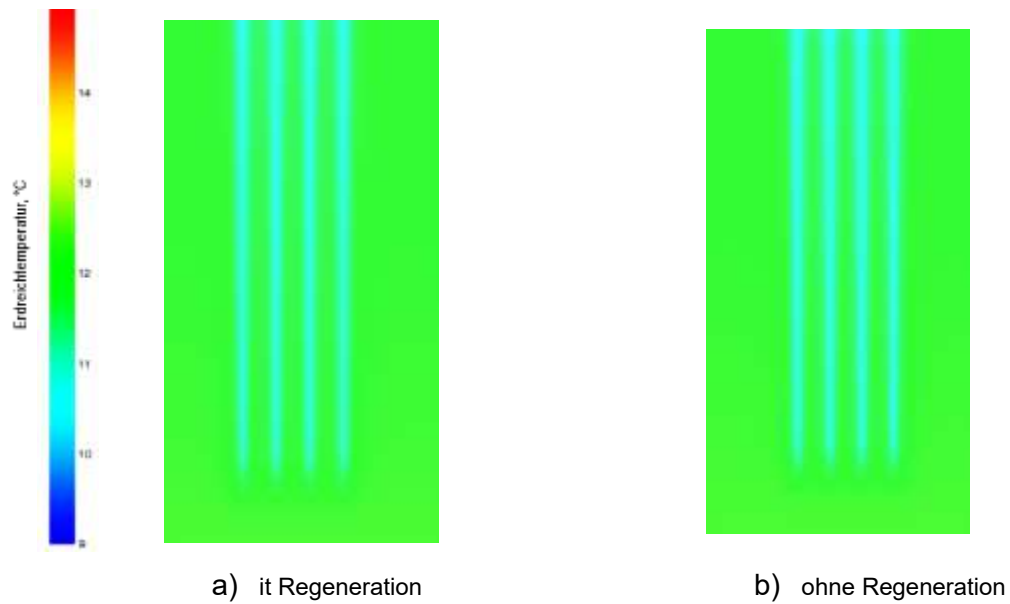


Abbildung 127: Februar 2018, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt

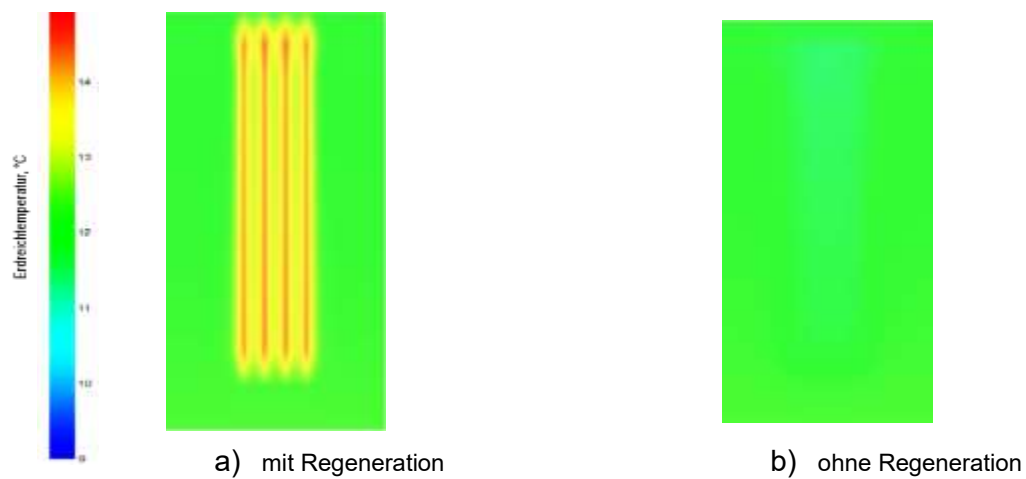


Abbildung 128: September 2018, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt

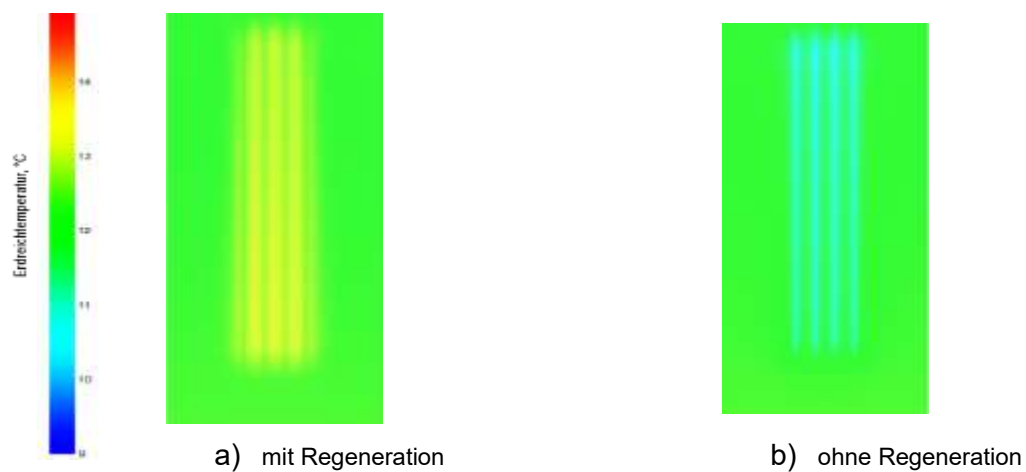


Abbildung 129: November 2018, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt

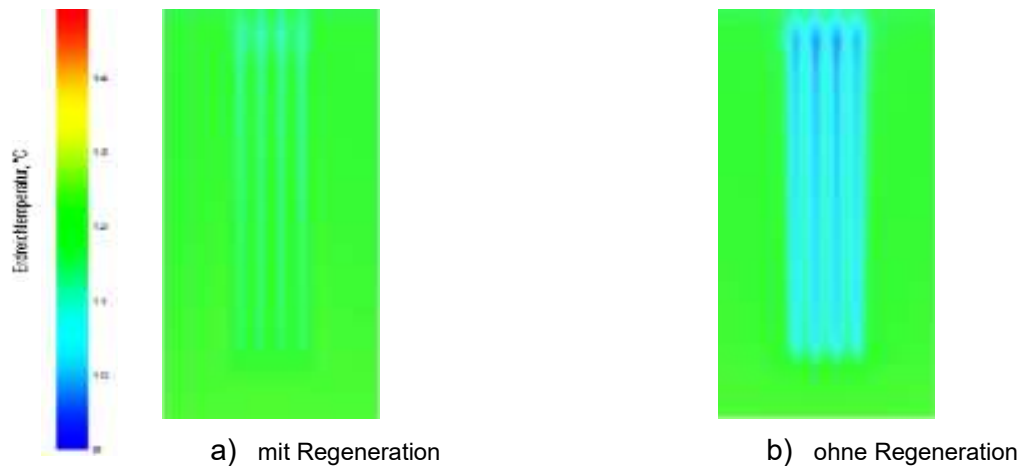


Abbildung 130: Februar 2019, Erdreichtemperatur im Vertikalschnitt

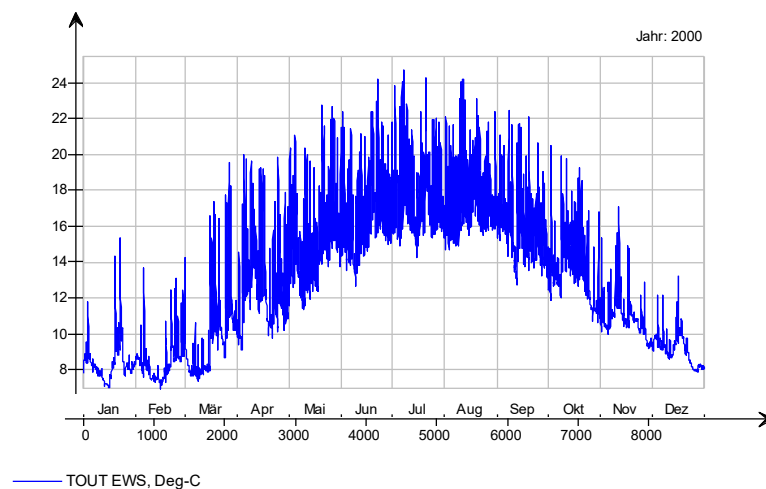


Abbildung 131: Rücklauftemperatur der Erdwärmesonden mit Regeneration im ersten Simulationsjahr

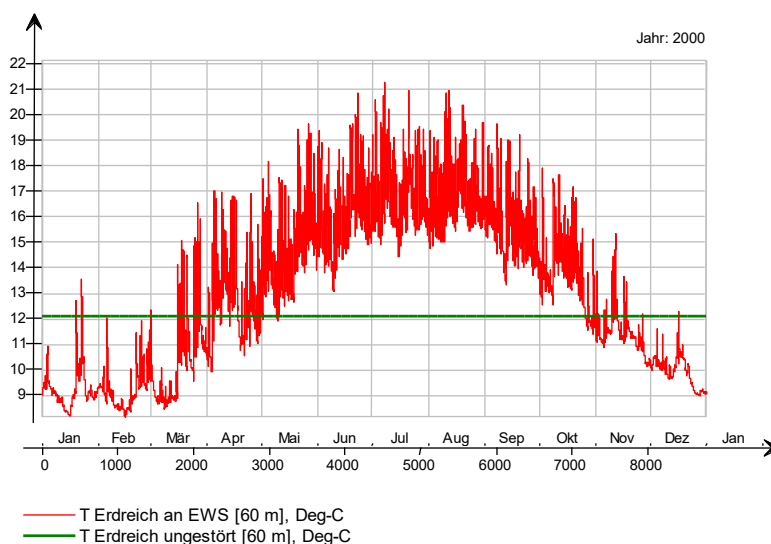


Abbildung 132: Erdreichtemperatur ungestört und bei Einfluss der Erdwärmesonden und Regeneration im ersten Simulationsjahr

Darüber hinaus schlagen Abbildung 133, Abbildung 134 und Tabelle 34 die Brücke zur elektrischen Seite des Energiesystems.

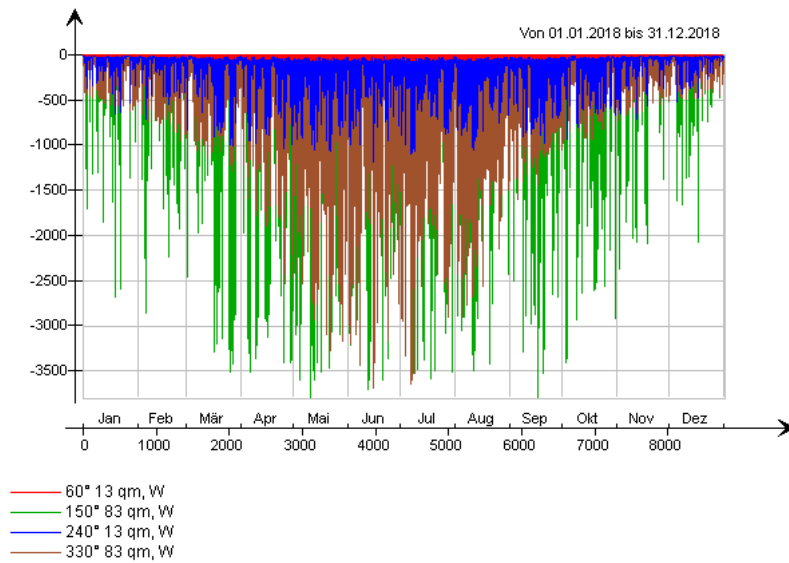


Abbildung 133: Leistung der Dachflächen je Ausrichtung

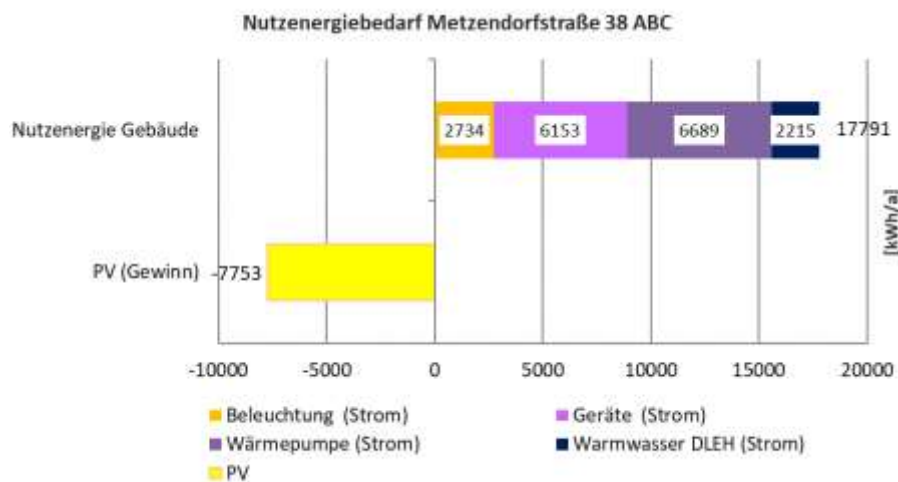


Abbildung 134: Bilanzielle Übersicht über die jährliche elektrische Energieverteilung des Gebäudes Metzendorfstraße 38 ABC

Tabelle 34: Überblick über die Dachflächen

Ausrichtung	NO (60°)	SO (150°)	SW (240°)	NW (330°)
Fläche [m ²]	13	83	13	83
Leistung [kWh/a]	67	3516	965	3205
Spezifische Leistung [kWh/ m ² a]	5,2	42,4	74,2	38,6

AP 1.5 überschreitet die reine Gebäudesimulation im engeren Sinne und zeigt, dass die Bewertung historischer Gebäude zunehmend im Kontext gekoppelter Wärme- und Stromsysteme erfolgen muss. In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 1.5 damit als dasjenige Arbeitspaket einzuordnen, in dem die zuvor ermittelten Befunde zu Bestand, Hülle und bauphysikalischer Eignung in ein dynamisches Gesamtmodell überführt wurden. Die thermische Gebäudesimulation machte es möglich, die Auswirkungen von Sanierungsvarianten nicht nur auf den Jahresenergiebedarf, sondern auch auf Oberflächentemperaturen, sommerliche Überwärmung, Heizlast, Wärmeübergabe, Wärmepumpenauslegung, Quellensysteme und zeitlich aufgelöste Lastgänge zu bewerten. Es ist hervorzuheben, dass die Ergebnisse nicht auf eine singuläre „Op-

timallösung“ hinauslaufen, sondern auf eine fachlich begründete Eingrenzung robuster, denkmalverträglicher und systemisch konsistenter Maßnahmenkombinationen. AP 1.5 schafft die methodische und inhaltliche Grundlage, auf der in AP 1.6 konkrete gebäudebezogene Sanierungskonzepte abgeleitet und priorisiert werden können.

Aufbauend auf den in AP 1.1 bis AP 1.5 erarbeiteten Bestandsanalysen, Monitoringdaten, Energiebedarfsberechnungen, thermisch-hygrischen Untersuchungen und thermischen Gebäudesimulationen wurden in AP 1.6 die Ergebnisse zu gebäudebezogenen Sanierungskonzepten zusammengeführt. Ziel dieses Arbeitspakets war es, aus den zuvor einzeln untersuchten Maßnahmen keine isolierten Einzellösungen, sondern umsetzbare, für typische Gebäude der Siedlung geeignete Maßnahmenkombinationen abzuleiten. AP 1.6 übernimmt damit innerhalb von Teilprojekt 1 die Funktion der integrativen Verdichtung: Die in den vorangegangenen Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnisse werden hier so zusammengeführt, dass daraus anwendbare Konzepte für die energetische Sanierung unter den Randbedingungen des denkmalgeschützten Bestands entstehen.

Inhaltlich knüpft AP 1.6 unmittelbar an die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete an. Aus AP 1.3 lag die Erkenntnis vor, dass Maßnahmen an der Gebäudehülle einen wesentlichen Einfluss auf die Reduktion des Heizwärmebedarfs besitzen. AP 1.4 zeigte, dass der Einsatz eines Aerogel-Dämmputzes als innenseitige Hüllertüchtigung bauphysikalisch grundsätzlich möglich ist, sofern die konstruktiven Randbedingungen beachtet und die Dämmstärken auf das jeweilige Außenmauerwerk abgestimmt werden. AP 1.5 machte darüber hinaus deutlich, dass der Erfolg einer energetischen Modernisierung im Bestand nicht allein von der Verbesserung einzelner U-Werte abhängt, sondern wesentlich vom abgestimmten Zusammenwirken von Hüllstandard, Wärmeübergabe, Wärmeerzeugung, Dachnutzung und gegebenenfalls elektrischer Speicherung bestimmt wird. Vor diesem Hintergrund war es folgerichtig, die Ergebnisse nicht in Form separater Technologieempfehlungen stehen zu lassen, sondern in konsistente Sanierungspakete zu überführen.

In den vorhergehenden Arbeitspaketen wurde benannt, welche Einzelmaßnahmen als Sanierungsbausteine im Rahmen des Vorhabens untersucht wurden. Hierzu zählen der Wärmedämmputz mit Aerogel als Innendämmung, die Fußbodenheizung zur Senkung der Vorlauftemperaturen, die Wärmepumpe zur Bereitstellung von Heizung und Trinkwarmwasser, die thermisch und elektrisch aktivierten Dachsteine zur Nutzung solarer Potenziale sowie ergänzende Komponenten wie Stromspeicher, Erdwärmesonden, die Dämmung des Daches, die Ertüchtigung der Fenster und die thermische Trennung des Kellers zum Wohnraum. Damit wird deutlich, dass AP 1.6 nicht auf eine singuläre Maßnahme abzielt, sondern auf eine modulare Systemlogik, in der je nach Gebäudezustand und denkmalpflegerischem Spielraum unterschiedliche Bausteine kombiniert werden können.

Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass die Maßnahmen nicht nur aufgezählt, sondern zugleich die technischen und objektspezifischen Voraussetzungen für ihren Einsatz benannt werden. So wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine Innendämmung mittels Dämmputz nur dort in Betracht kommt, wo keine erhaltenswerte originale Innenbemalung vorhanden ist. Ebenso wird der Einsatz aktivierter Dachsteine an die Bedingung geknüpft, dass eine Neueindeckung des Daches möglich ist; bei Gruppen mehrerer verbundener Gebäude mit ausgebauten und bewohnten Dachgeschossen wird diese Maßnahme ausdrücklich als problematisch eingestuft. Für die Entscheidung zwischen thermischen Speichern und Erdwärmesonden sind die Platzverhältnisse im Gebäude und im Garten sowie die Zufahrtsmöglichkeiten für Bohrgeräte zu prüfen. Auch der Einbau einer Fußbodenheizung ist nicht pauschal möglich, sondern setzt voraus, dass keine originalen, erhaltenswerten Innentüren entgegenstehen beziehungsweise dass ein schwellenloser

Übergang vom Treppenhaus in die übrigen Räume angestrebt wird. Zudem wird klar festgehalten, dass eine Fußbodenheizung mit niedrigen Vorlauftemperaturen nur bei gleichzeitiger Dämmung der Außenwände sinnvoll umgesetzt werden kann und dass für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe wiederum eine Flächenheizung mit niedrigen Vorlauftemperaturen erforderlich ist.

Die eigentliche Synthese der Ergebnisse erfolgt über die Zusammenstellung von Sanierungspaketen. Es werden zwei grundlegende Maßnahmenkombinationen unterschieden. Paket 1 umfasst die Dämmung der Außenwände sowie die Ertüchtigung der Fenster. Es handelt sich damit um ein vergleichsweise reduziertes, auf die Hüllverbesserung konzentriertes Maßnahmenbündel, das insbesondere dort sinnvoll erscheint, wo weitergehende Eingriffe in Dach, Wärmeübergabesystem oder Energieerzeugung aus denkmalpflegerischen, baulichen oder wirtschaftlichen Gründen nicht oder nur eingeschränkt möglich sind. Dieses Paket stellt gewissermaßen die minimale, aber bereits wirksame energetische Eingriffstiefe dar, mit der die wesentlichen Transmissionsverluste reduziert und die thermische Qualität des Gebäudes verbessert werden können.

Paket 2 ist demgegenüber als umfassendes integratives Sanierungskonzept formuliert. Es beinhaltet neben der Dämmung der Außenwände und der Ertüchtigung der Fenster zusätzlich die aktivierten Dachsteine, die Dämmung des Daches, die thermische Trennung des Kellers zum Wohnraum, einen Stromspeicher, Erdwärmesonden, eine Fußbodenheizung sowie eine Wärmepumpe. Dieses Paket bildet damit die vollständige LowEx-Strategie des Vorhabens ab. Charakteristisch ist, dass nicht nur die Gebäudehülle verbessert, sondern gleichzeitig die Voraussetzungen für niedrige Systemtemperaturen, eine weitgehende Elektrifizierung der Wärmeversorgung, die Nutzung regenerativer Energiequellen und die Speicherung von Überschüssen geschaffen werden. Paket 2 steht damit für den systemischen Ansatz des Projekts: Die volle Wirkung der Einzeltechnologien entfaltet sich erst im Zusammenspiel von Hüllsanierung, Niedertemperatur-Wärmeübergabe, effizienter Wärmeerzeugung, regenerativer Stromgewinnung und Speicherintegration.

Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 135 visualisiert. Die Abbildung hat für AP 1.6 eine zentrale Funktion, weil sie die im Projekt entwickelten Einzelmaßnahmen nicht nebeneinanderstellt, sondern in ihrer Kombinierbarkeit und Abstufung veranschaulicht. Abbildung 135 verdeutlicht die beiden grundlegenden Sanierungspfade: zum einen ein fokussiertes Hüllpaket mit Außenwanddämmung und Fensterertüchtigung, zum anderen ein erweitertes Systempaket, das Hülle, Anlagentechnik, regenerative Energiegewinnung und Speicherkomponenten zu einem gesamthaften Modernisierungskonzept verbindet. Die Abbildung macht damit anschaulich, dass die energetische Optimierung des denkmalgeschützten Bestands nicht über eine universelle Standardmaßnahme erfolgt, sondern über abgestufte, objektspezifisch kombinierbare Maßnahmenbündel.

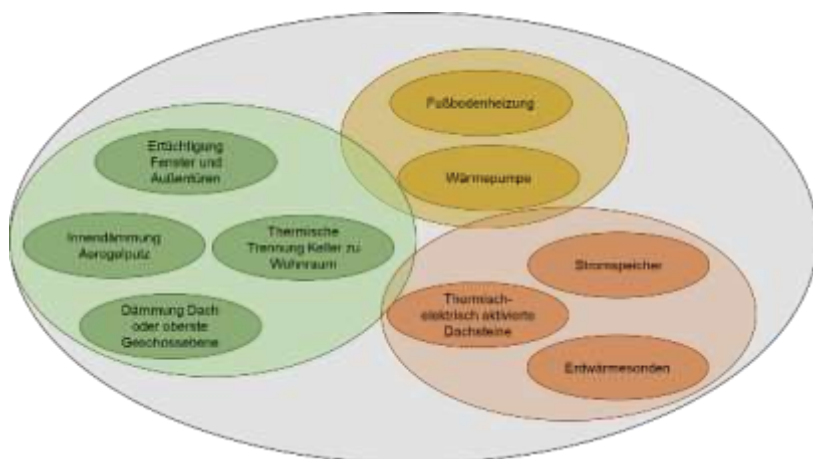


Abbildung 135: Kombinationen der Sanierungsbausteine

Von besonderer Relevanz für die Bewertung ist zudem, dass die individuelle Effizienzsteigerung je Objekt nicht pauschal, sondern als Ergebnis einer objektspezifischen Anpassung der Berechnungen und Simulationen beschreibt. Damit wird ausdrücklich festgehalten, dass die in AP 1.6 formulierten Sanierungskonzepte keine starren Typenlösungen sind. Vielmehr sind sie als übertragbare Grundmuster zu verstehen, deren konkrete energetische Wirkung jeweils anhand der vorliegenden Gebäudegeometrie, des Erhaltungszustands, der konstruktiven Randbedingungen und der anlagentechnischen Ausgangssituation zu bestimmen ist. Die Konzepte sind grundsätzlich verallgemeinerbar, ihre konkrete energetische Ausprägung bleibt jedoch objektspezifisch zu verifizieren.

Die praktische Relevanz von AP 1.6 zeigt sich darin, dass die auf dieser Grundlage entwickelten Sanierungskonzepte im weiteren Projektverlauf nicht theoretisch blieben, sondern in der Umsetzungsphase aufgegriffen wurden. Die erstellten Konzepte wurden in fünf Demonstratoren, nämlich drei Wohnungen und zwei Einfamilienhäusern, angewandt. Damit wurde die in AP 1.6 erarbeitete Konzeptlogik in die praktische Demonstration überführt und bildete die Grundlage für die in Teilprojekt 4 dokumentierte Planung und Umsetzung ausgewählter Maßnahmen. AP 1.6 ist somit nicht nur der Abschluss der konzeptionellen Arbeiten in Teilprojekt 1, sondern zugleich die direkte Brücke zur Realisierung im Quartier.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 1.6 damit als das Arbeitspaket einzuordnen, in dem die bis dahin gewonnenen bauphysikalischen, energetischen und anlagentechnischen Erkenntnisse in umsetzbare, denkmalverträgliche Sanierungskonzepte übersetzt wurden. Seine besondere Leistung besteht nicht in der Entwicklung einer universellen Standardlösung, sondern in der Ableitung belastbarer Maßnahmenpakete, die einerseits den unterschiedlichen Objektbedingungen im Quartier Rechnung tragen und andererseits den systemischen Anspruch des Vorhabens wahren.

II.6.2 Teilprojekt 2 – Entwicklung und Erprobung denkmalgerechter Technologien

Teilprojekt 2 knüpft unmittelbar an die Ergebnisse von Teilprojekt 1 an. Während in TP 1 zunächst die bauphysikalischen, energetischen und gebäudebezogenen Grundlagen des denkmalgeschützten Bestands erarbeitet sowie daraus integrative Sanierungskonzepte abgeleitet wurden, richtet sich der Fokus in TP 2 auf die technologische Konkretisierung dieser Ergebnisse. Ziel war es, innovative LowEx-Technologien nicht nur konzeptionell zu benennen, sondern sie für den Einsatz im Baudenkmal weiterzuentwickeln, an die besonderen Randbedingungen des Bestands anzupassen und hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit und Integrationsfähigkeit zu untersuchen. TP 2 übernimmt damit innerhalb des Gesamtvorhabens die Funktion der technologischen Vertiefung und experimentellen Absicherung.

Im Zentrum des Teilprojekts steht die Fragestellung, wie sich innovative Komponenten zur Effizienzsteigerung so weiterentwickeln lassen, dass sie unter den konstruktiven, denkmalpflegerischen und nutzungsbezogenen Bedingungen der Margarethenhöhe praktisch anwendbar werden. Als innovative Komponenten werden insbesondere die energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle mit Hochleistungsdämmputz, die Entwicklung geeigneter Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme, den Einsatz und die Optimierung von Mikrowärmepumpen, die Entwicklung thermisch-elektrisch aktivierter Dachsteine, gebäude- und quartiersintegrierte Strom- und Wärmespeicherlösungen, digitale Kommunikations- und Smart-Home-Systeme sowie energieeffiziente LED-Technologien gesehen. Die Technologien sollten sowohl im Labor als auch in Demonstratorgebäuden untersucht werden. Damit ist TP 2 weder als reine Laborentwicklung noch als reine Umsetzungsbeschreibung zu verstehen, sondern als Bindeglied zwischen Konzeptentwicklung und realer Demonstration.

Aus der Logik des Vorhabens ergibt sich zugleich, dass TP 2 nicht isoliert betrachtet werden kann. Die in TP 1 entwickelten Sanierungspakete und die dort identifizierten technischen Randbedingungen bilden die fachliche Ausgangsbasis für die Auswahl, Weiterentwicklung und Bewertung der Technologien. Umgekehrt schaffen die Ergebnisse aus TP 2 die Grundlage für die spätere Systemintegration in TP 3 sowie für die praktische Umsetzung in TP 4.

AP 2.1 knüpft unmittelbar an die Ergebnisse aus Teilprojekt 1 an. Nachdem dort gezeigt werden konnte, dass innenseitige Hüllertüchtigungen für die Margarethenhöhe energetisch wirksam und bei geeigneter Bemessung auch bauphysikalisch tragfähig sind, bestand die Aufgabe in Teilprojekt 2 darin, die hierfür maßgebliche Schlüsseltechnologie – den Hochleistungsdämmputz – materialtechnisch und hygrothermisch so zu charakterisieren, dass belastbare Simulationsmodelle für die Anwendung als Innendämmung erstellt werden konnten. Das Arbeitspaket war damit nicht auf eine handwerkliche Anwendungserprobung im engeren Sinne beschränkt, sondern diente vor allem der wissenschaftlichen Fundierung des Dämmputzsystems als Bestandteil der in TP 1 entwickelten Sanierungskonzepte. Als Zielsetzung werden ausdrücklich die Analyse des hygrothermischen Verhaltens eines Hochleistungsdämmputzes zum Erstellen von Simulationsmodellen für die Anwendung als Innendämmung sowie die geplanten Arbeitsschritte Materialuntersuchungen zum thermischen und hygrischen Verhalten, Optimierung der Putzrezeptur in Bezug auf Leichtzuschlag, Optimierung des Systemaufbaus und vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Systemvarianten benannt.

Den Ausgangspunkt bildet die Beschreibung des untersuchten Dämmputzsystems. Dieses wird in Abbildung 136 dargestellt. Es wird deutlich, dass nicht nur der eigentliche Aerogel-Dämmputz betrachtet wurde, sondern das gesamte Putzsystem aus Grundputz, Hochleistungsdämmputz, Spezial-Einbettmörtel und Deckputz. Für die Laboranalysen wurden konkret der Grundputz HASIT 610, der Hochleistungsdämmputz HASIT Fixit 222 Aerogel, der Spezial-Einbettmörtel HASIT Fixit 223 sowie der Deckputz HAIST Renodesign 252 verwendet. Diese Systembetrachtung ist

fachlich wesentlich, weil die hygrothermische Wirkung einer Innendämmung nicht allein vom Dämmkern, sondern vom Zusammenwirken aller Schichten abhängt. Gerade im historischen Bestand ist deshalb die Betrachtung des kompletten Schichtaufbaus erforderlich.

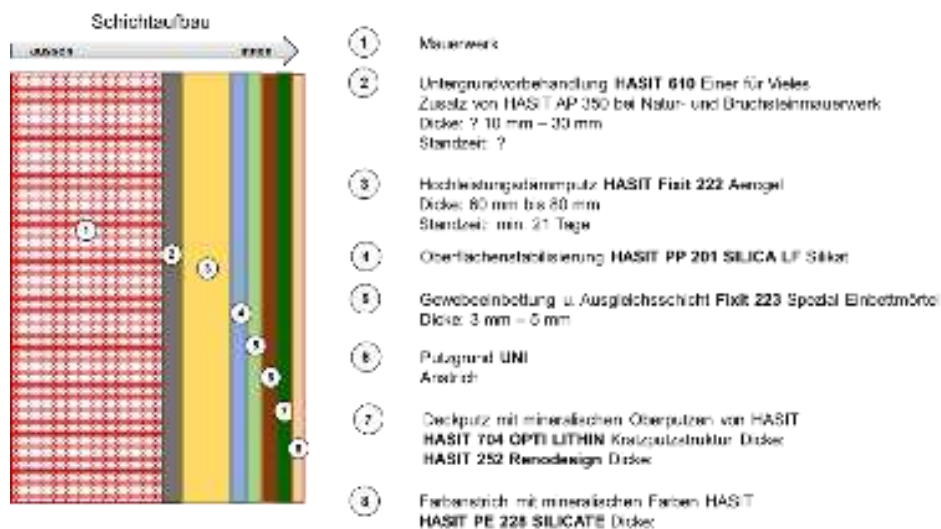


Abbildung 136: Komponenten des Putzsystems des Hochleistungsdämmputzes

Für die Herstellung der Laborproben wurden – soweit verfügbar – die Angaben des Technischen Merkblatts des Herstellers zugrunde gelegt. Die Mischungsherstellung erfolgte händisch; für alle Putzkomponenten wird eine Mischzeit von zwei bis drei Minuten genannt, um eine homogene Masse zu erhalten. Die dabei angesetzten Mischungsverhältnisse und Mischungsbedingungen sind in Tabelle 35 dokumentiert.

Tabelle 35: Mischungsverhältnis und Mischbedingungen der Putzsystemkomponenten

Art	Verhältnis Was- ser/Mörtel	Mischzeit [s]	Misch- stufe	Lagerzeit in Schalung [d]	Bemerkung
Grundputz	≈0,21	137	2	1	
Einbettmörtel	≈0,35	50,4	1 und 2	1	
Hochleistungs- dämmputz	≈ 1,4	57,3	2	23	noch feucht in Schalung

Tabelle 35 zeigt, dass sich die drei untersuchten Komponenten bereits in der Probenherstellung deutlich unterscheiden: Der Grundputz wurde mit einem Wasser/Mörtel-Verhältnis von etwa 0,21, einer Mischzeit von 137 s und einer Lagerzeit in der Schalung von 1 d verarbeitet; der Einbettmörtel mit einem Verhältnis von etwa 0,35, einer Mischzeit von 50,4 s und ebenfalls 1 d Lagerzeit; der Hochleistungsdämmputz dagegen mit einem deutlich höheren Wasser/Mörtel-Verhältnis von etwa 1,4, einer Mischzeit von 57,3 s und einer Lagerzeit von 23 d, wobei angemerkt wurde, dass das Material in der Schalung noch feucht war. Bereits daraus wird ersichtlich, dass der Aerogel-Dämmputz im Vergleich zu den übrigen Schichten ein deutlich anderes Verarbeitungs- und Trocknungsverhalten aufweist. Abbildung 137 veranschaulicht diesen Zustand unmittelbar nach dem Anmischen. Für die Schlussdarstellung ist dies nicht nur ein verarbeitungstechnisches Detail, sondern ein Hinweis auf die materialtypische Eigenart des Systems, die bei Laborcharakterisierung und späterer Anwendung zu berücksichtigen ist.



Abbildung 137: Frisch angemischter Hochleistungsdämmputz

Die eigentliche wissenschaftliche Leistung des Arbeitspakets liegt in der Ermittlung der für die thermisch-hygrische Beschreibung des Wärmedämmsystems erforderlichen Kennwerte. Hierfür wurden folgende Untersuchungsmethoden angewandt: Bestimmung der Wasseraufnahme lang- und kurzzeitig, Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten, Bestimmung der Porenverteilung, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sowie Bestimmung der offenen Porosität, der Rein- und Rohdichte.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 36 zusammengefasst. Tabelle 38 zeigt sehr deutlich die material-spezifischen Unterschiede zwischen den einzelnen Schichten. Besonders auffällig ist der Hochleistungsdämmputz: Er weist bei einer Reindichte von $0,23 \text{ g/cm}^3$ und einer Rohdichte von $0,18 \text{ g/cm}^3$ eine ausgesprochen leichte Struktur auf; gleichzeitig liegt seine Wärmeleitfähigkeit bei $0,143 \text{ W/(mK)}$ und damit deutlich unter der des Grundputzes mit $0,52 \text{ W/(mK)}$ sowie des Einbettmörtels mit $0,352 \text{ W/(mK)}$. Zugleich zeigt Tabelle 38, dass der Dämmputz mit einer langzeitigen Wasseraufnahme von $124,47 \text{ M.-%}$ und einem Wassergehalt bei $80 \% \text{ r. F.}$ von $4,36 \text{ M.-%}$ ein hygrisch stark reagierendes Material ist. Damit wird unmittelbar nachvollziehbar, weshalb für seine Verwendung als Innendämmung eine detaillierte hygrothermische Modellierung erforderlich ist: Das Material kombiniert sehr gute wärmetechnische Eigenschaften mit einer ausgeprägten Feuchtesensibilität.

Tabelle 36: Zusammenfassung verschiedener feuchte- und wärmetechnischer Kennwerte [2]

Kennwert	HASIT Grundputz	HASIT Dämmputz	HASIT Einbettmörtel
Offene Porosität (%)	29,25	22,36	20,86
Wasseraufnahme lang (M.-%)	18,70	124,47	16,48
Wasseraufnahme kurz (M.-%)	17,81	27,91	5,09
Reindichte (g/cm^3)	2,24	0,23	1,60
Rohdichte (g/cm^3)	1,58	0,18	1,27
Wasseraufnahmekoeffizient ($\text{kg/m}^2\text{vs}$)	0,122	0,033	0,030
Wassergehalt 80% (M.-%)	1,137	4,36	0,927
Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))	0,52	0,143	0,352

Auf Grundlage dieser Laborergebnisse wurden die einzelnen Baustoffe anschließend im Materialgenerator des thermisch-hygrischen Simulationsprogramms abgebildet. Die daraus generierten Materialmodelle werden in Abbildung 138 bis Abbildung 141 dokumentiert.

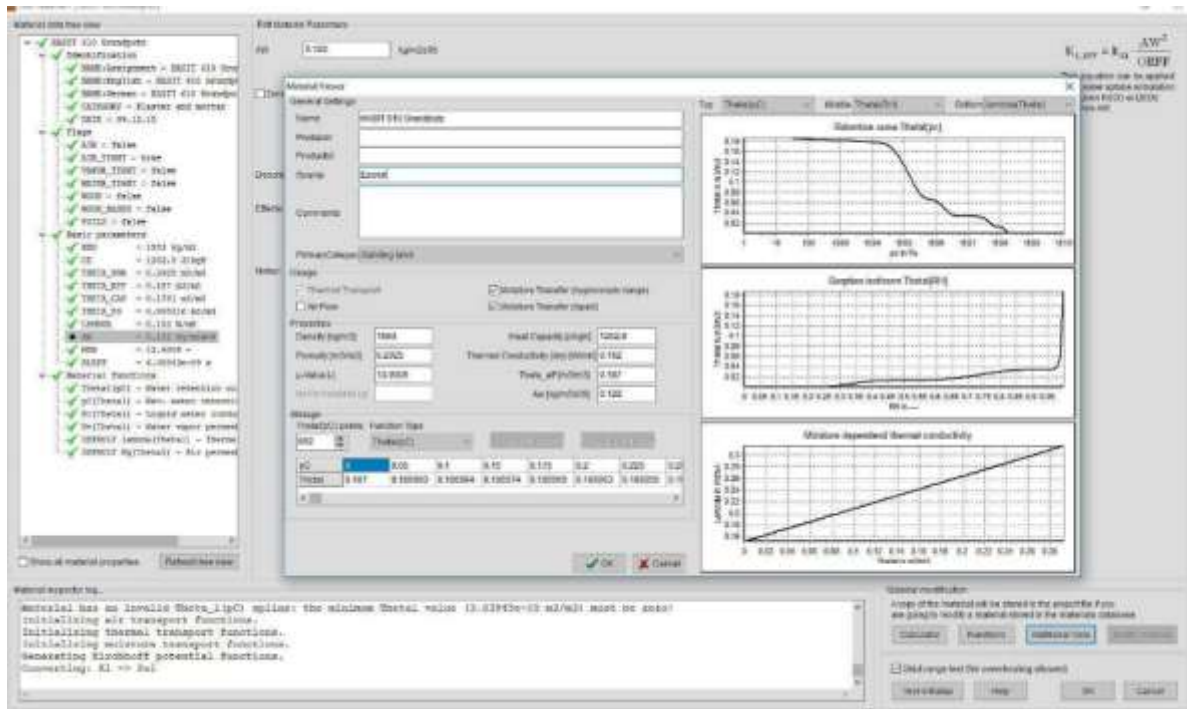


Abbildung 138: Materialmodell – Grundputz HASIT 610

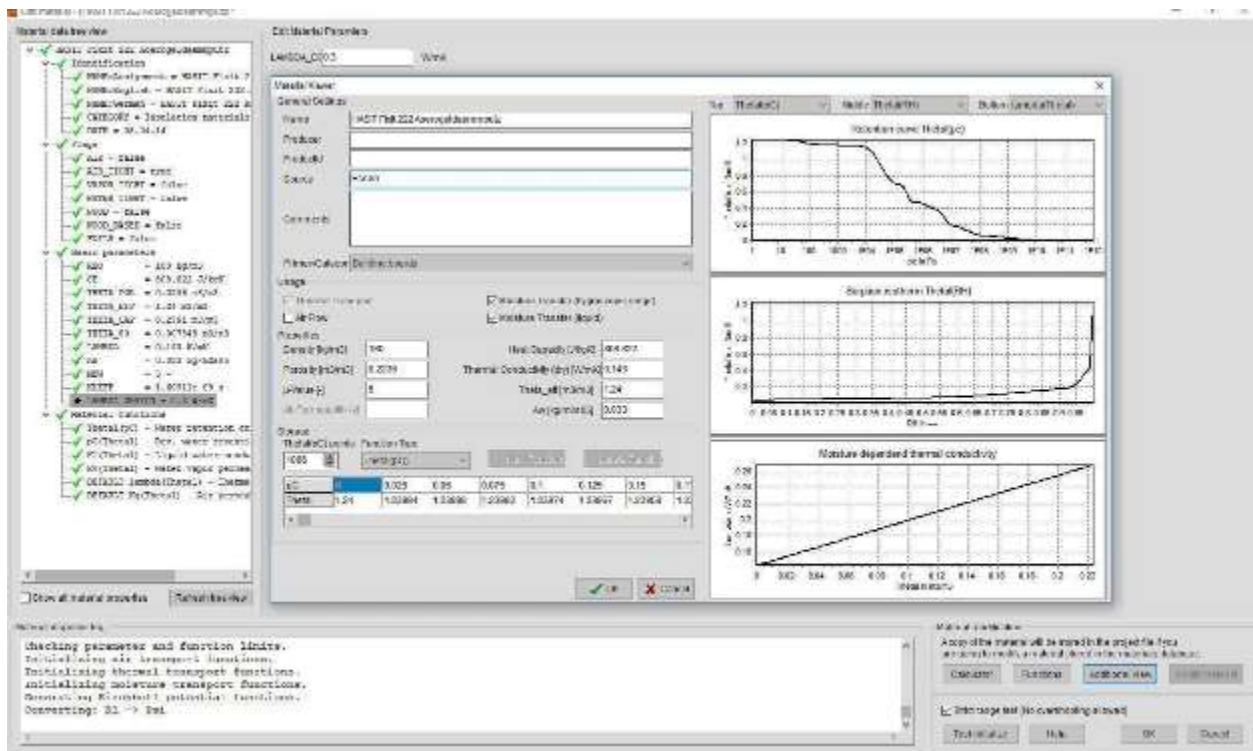


Abbildung 139: Materialmodell – Hochleistungsdaämmputz HASIT Fixit 222

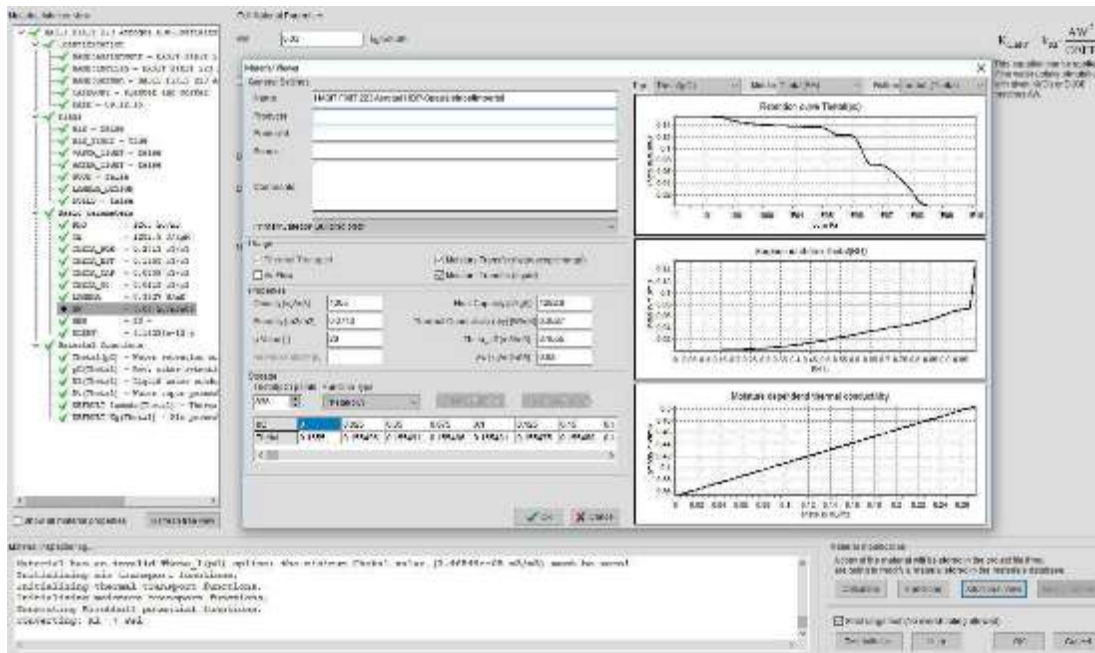


Abbildung 140: Materialmodell – Spezial Einbettmörtel HASIT Fixit 223

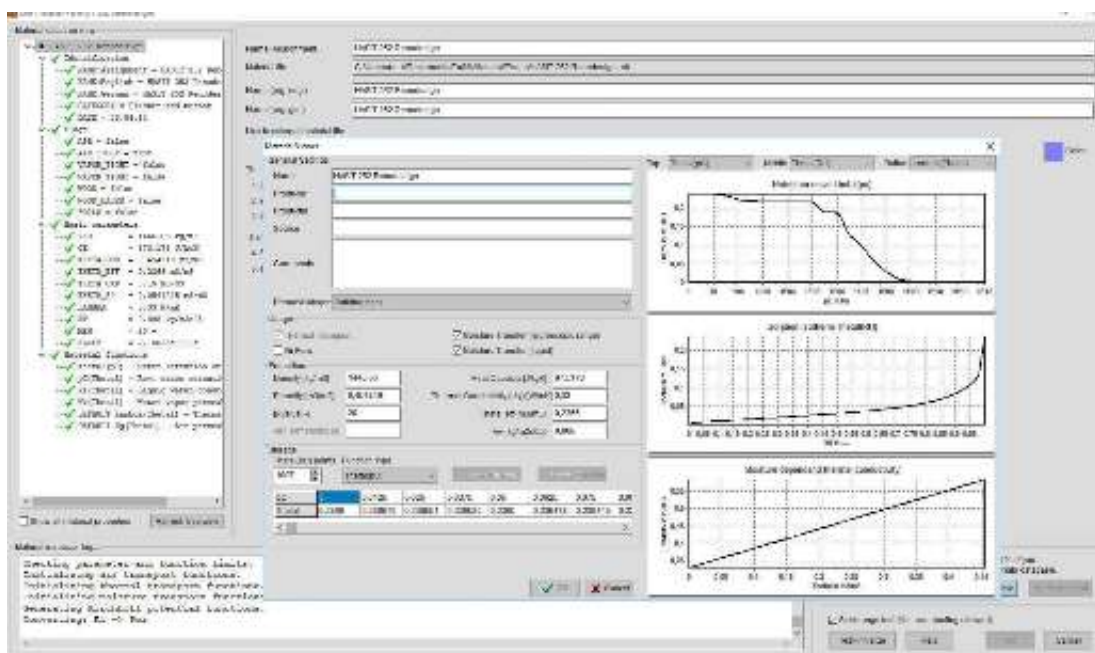


Abbildung 141: Materialmodell – Deckputz HAIST Renodesign 252

Diese vier Abbildungen haben innerhalb von AP 2.1 eine zentrale Bedeutung, weil sie die Brücke zwischen experimenteller Materialcharakterisierung und simulationsgestützter Anwendung herstellen. Erst durch diese Materialmodelle konnten, die in TP 1 und später in den weiteren Arbeitspaketen benötigten, thermisch-hygrischen Berechnungen auf eine konsistente und projektspezifische Datengrundlage gestellt werden. AP 2.1 liefert damit nicht nur Stoffkennwerte, sondern direkt nutzbare Simulationsparameter für die weitere Systembewertung.

Ein weiterer Punkt des Arbeitspakets betrifft die vorgesehene Optimierung der Putzrezeptur in Bezug auf Leichtzuschlag. Eine solche Rezepturoptimierung konnte im Projekt nicht durchgeführt werden, weil hierfür eine Zuarbeit des Putzherstellers HASIT erforderlich gewesen wäre. Trotz mehrfacher Aufforderung wurde jedoch kein Angebot seitens des Herstellers abgegeben. Dar-

über hinaus ergaben die Recherchen, dass ein Ersetzen der Aerogele im Putz durch andere Stoffe nur schwer möglich ist, da der Putz dann eine noch geringere Festigkeit erhalten würde, als dies bereits beim Aerogel-Dämmputz der Fall ist.

In der zusammenfassenden Bewertung ist AP 2.1 damit als grundlegendes Material- und Modellierungsarbeitspaket innerhalb von Teilprojekt 2 einzuordnen. Somit wurde das Hochleistungsdämmputzsystem so charakterisiert, dass seine Verwendung in thermisch-hygrischen Simulationsrechnungen belastbar abgebildet werden kann. Das Arbeitspaket hat damit eine wesentliche Voraussetzung für die wissenschaftliche Absicherung des Innendämmkonzepts geschaffen. Zugleich wurde deutlich, dass die Weiterentwicklung des Systems in Richtung Rezepturoptimierung nur eingeschränkt im Projekt selbst lag, sondern von externer Herstellerunterstützung abhing.

AP 2.2 schließt inhaltlich unmittelbar an die Ergebnisse aus Teilprojekt 1 sowie an AP 2.1 an. Während in Teilprojekt 1 gezeigt werden konnte, dass eine energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle die Voraussetzung für abgesenkte Heizlasten und damit für einen LowEx-Betrieb schafft, richtet sich der Fokus in AP 2.2 auf die Frage, wie die Wärme unter diesen Randbedingungen in den Räumen tatsächlich übergeben werden kann. Ziel dieses Arbeitspakets war damit die Analyse der möglichen Einbindung kompakter Fußbodenheizungssysteme in vorhandene und energetisch ertüchtigte Gebäudeumgebungen. Der Schwerpunkt lag folglich nicht auf der klassischen Heizkörperauslegung, sondern auf der Entwicklung einer Wärmeübergabelösung, die mit niedrigen Heiztemperaturmedien arbeitet und damit mit Wärmepumpen- und LowEx-Konzepten kompatibel ist.

Als Arbeitsschritte wurden zunächst erste messtechnische Untersuchungen und die Charakterisierung des dynamischen Verhaltens eines kompakten Fußbodenheizungssystems am GWI. Darauf aufbauend sollte ein entsprechendes System in Modelica programmiert und modelliert sowie für die Simulation in IDA ICE abgestimmt werden. Hinzu kamen die Simulation und Bewertung verschiedener Einbindungsmöglichkeiten, die Validierung des Modells anhand von Messdaten sowie schließlich die Auslegung, Anpassung und Optimierung eines Fußbodenheizungssystems an die Gegebenheiten des historischen Bestands. Bereits aus dieser Arbeitslogik wird deutlich, dass AP 2.2 als Verbindung zwischen experimenteller Untersuchung, Simulationsmodellierung und gebäudebezogener Anwendung konzipiert war. Das Arbeitspaket sollte also eine wissenschaftlich belastbare Grundlage dafür schaffen, Flächenheizsysteme nicht nur technisch auszuwählen, sondern auch in ihrem dynamischen Verhalten und in ihrer Eignung für den historischen Gebäudebestand zu verstehen.

Die Notwendigkeit dieses Arbeitspakets ergibt sich unmittelbar aus dem im Projekt verfolgten LowEx-Ansatz. Die Umsetzung des LowEx-Konzepts im historischen Gebäudebestand der Margarethenhöhe erfordert eine Anpassung der Raumheizungen, damit eine Wärmeübergabe bei niedrigen Heiztemperaturen möglich wird. Als besonders geeignet werden hierfür Flächenheizungen beschrieben, weil durch ihre großflächige Strahlungswärme eine höhere thermische Behaglichkeit erzielt werden kann, sodass die erforderliche Raumlufttemperatur niedriger gehalten werden kann. Die Flächenheizung ist die notwendige Schnittstelle zwischen hüllseitiger Verbesserung und effizienter Niedertemperatur-Wärmeerzeugung.

Im Projektverlauf wurde hierfür – abweichend von der ursprünglichen Planung – ein Fußbodenheizungssystem von KERMI C16 und C15 ausgewählt. Diese Änderung ist im Text ausdrücklich zu benennen, da sie einen wesentlichen projektspezifischen Entwicklungsschritt darstellt. Sie zeigt, dass die Auswahl der Wärmeübergabetechnik nicht statisch blieb, sondern an die im Projekt konkretisierten Randbedingungen angepasst wurde. Zugleich wird deutlich, dass zu diesem Zeitpunkt noch offene Fragestellungen hinsichtlich der tatsächlich zu realisierenden Fußbodenaufbauten bestanden. Aus diesem Grund konnte das Fußbodenheizungssystem im Forschungs-

zeitraum nicht bestellt und folglich auch nicht experimentell untersucht werden. Für die Bewertung von AP 2.2 ist dieser Punkt wesentlich: Das Arbeitspaket liefert damit zwar eine klare technische Ausrichtung und eine belastbare Begründung der Systemwahl, erreicht jedoch die ursprünglich vorgesehene experimentelle Vertiefung noch nicht vollständig.

Methodisch besonders wichtig ist die geplante Untersuchung der Wärmeabgabeleistung und des dynamischen Verhaltens des Fußbodenheizungssystems an einem Prüfstand des GWI. Von besonderem Interesse war dabei das Verhalten bei kurzfristiger Beladung und Entladung. Im Kontext intelligenter Regelung und gekoppelter Wärmepumpensysteme ist nicht allein die maximale Wärmeleistung entscheidend, sondern vor allem die Frage, wie schnell das System auf Laständerungen reagiert, welche Speicherwirkung der Aufbau besitzt und in welchem Maß eine flexible Betriebsweise mit niedrigen Vorlauftemperaturen möglich ist. Damit adressiert AP 2.2 einen Kernaspekt der späteren Einbindung in Smart-Home- und Energiemanagementstrategien.

Das Forschungsprojekt formuliert entsprechend das Ziel, ein Modell zu entwickeln, das den dynamischen Betrieb des Fußbodenheizungssystems in Zusammenarbeit mit neuen und konventionellen Wärmebereitstellungssystemen untersucht. Speziell im Hinblick auf die Integration in eine Smart-Home-Regelung werden die Potenziale und Grenzen des dynamischen Betriebs und damit der Wärmeübergabe bei niedrigen Vorlauftemperaturen ausdrücklich als wesentlich für die erfolgreiche Realisierung im historischen Gebäudebestand benannt. Für die fachliche Einordnung bedeutet dies, dass AP 2.2 die Wärmeübergabe nicht isoliert als Komponente betrachtet, sondern bereits als Teil eines regelbaren und digital vernetzten Gesamtsystems. Genau an dieser Stelle wird die enge Verbindung zu den späteren Arbeitspaketen zur Wärmepumpe, zur Gebäudeautomation und zur Quartiersvernetzung deutlich.

Gleichzeitig werden die projektpraktischen Grenzen der Umsetzung aufgezeigt. Der Einbau des Fußbodenheizungssystems in den Prüfstand am GWI konnte nicht erfolgen. Als Gründe werden genannt, dass unterschiedliche Heizsysteme zeitweise nicht am Markt beschafft werden konnten und dass zugleich verschiedene Bodenaufbauten in den Objekten ausgeführt wurden. Gerade in einem denkmalgeschützten Quartier mit objektspezifisch unterschiedlichen Konstruktionsrandbedingungen ist diese Einordnung wesentlich.

In der zusammenfassenden Bewertung ist AP 2.2 damit als Scharnierarbeitspaket zwischen Gebäudehülle, Wärmeerzeugung und Regelung einzuordnen. Das Arbeitspaket konkretisiert die in Teilprojekt 1 bereits als notwendig identifizierte Umstellung auf LowEx-taugliche Wärmeübergabesysteme und formuliert dafür einen wissenschaftlich tragfähigen Untersuchungsansatz aus Prüfstandsuntersuchung, dynamischer Modellbildung und simulationsgestützter Bewertung. Gleichzeitig zeigt sich, dass die im Projekt geplante experimentelle Validierung aufgrund offener konstruktiver Randbedingungen und marktseitiger Verfügbarkeitsprobleme nicht im ursprünglich vorgesehenen Umfang umgesetzt werden konnte. Der fachliche Ertrag des Arbeitspakets liegt daher vor allem in der klaren Systemscheidung zugunsten kompakter Fußbodenheizungssysteme, in der begründeten Einordnung ihrer Relevanz für den LowEx-Betrieb sowie in der Vorbereitung ihrer modellgestützten Untersuchung in Verbindung mit Wärmepumpen- und Smart-Home-Konzepten.

AP 2.3 hatte die Aufgabe, die im Projekt verfolgten LowEx-Konzeptionen auf der Seite der Wärmeerzeugung technisch abzusichern. Während in AP 2.2 die Frage im Vordergrund stand, wie mit niedrigen Vorlauftemperaturen Wärme wirksam an die Räume übergeben werden kann, untersucht AP 2.3, wie diese niedrigen Temperaturniveaus durch ein geeignetes Wärmepumpensystem zuverlässig, effizient und dynamisch bereitgestellt werden können. Die genannten Arbeitsschritte umfassen hierzu erste Untersuchungen eines Mikro-Wärmepumpensystems am Prüfstand des GWI, die Programmierung bzw. Modellierung der Wärmepumpe in Modelica zur

späteren Einbindung in die Gebäudesimulation, die Ermittlung geeigneter Wohneinheiten für eine Integration von Wärmepumpen, die Analyse des Systems unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmequellen sowie die Optimierung des Einsatzes im modularen LowEx-Gesamtkonzept. Im Rahmen dieser vorbereitenden Untersuchungen wurde exemplarisch eine Wärmepumpe vermessen. Die Auswahl erfolgte in Anpassung an die im Projekt angestrebten Temperaturbereiche auf Quellen- und Senkenseite. Den experimentellen Kern des Arbeitspakets bildet der in Abbildung 142 dargestellte Versuchsstand.

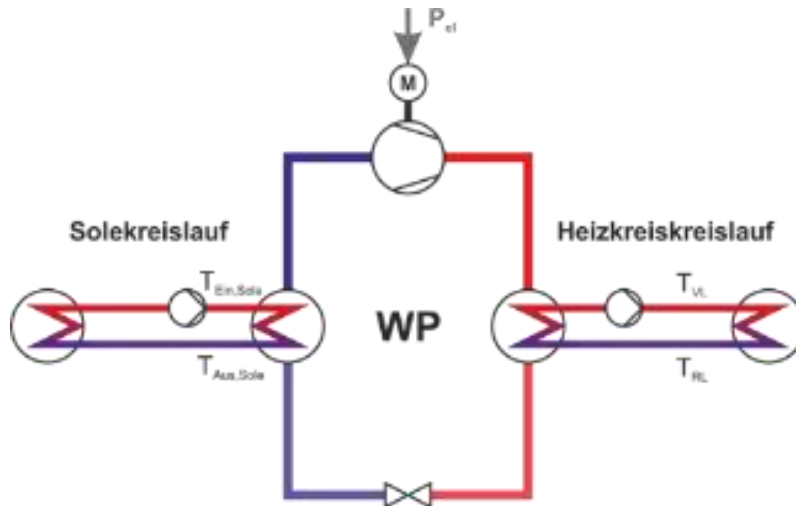


Abbildung 142: Schematischer Aufbau Wärmepumpenprüfstand

Er diente dazu, das System unter definierten Randbedingungen messtechnisch zu charakterisieren und damit eine belastbare Grundlage für die spätere Modellbildung und Systemintegration zu schaffen. Die Messungen der verschiedenen Quellen-Senken-Kombinationen erfolgten gemäß DIN EN 14511.

Die Messergebnisse wurden sowohl tabellarisch als auch grafisch ausgewertet. Dabei dokumentiert Tabelle 37 die Ergebnisse für die untersuchten Temperaturkombinationen, während Tabelle 38 die Betriebszustände bei minimaler elektrischer Leistungsaufnahme zusammenfasst.

Tabelle 37: Messergebnisse für verschiedene Sole/Wasser-Temperaturpaarungen

Messdauer	Sole/Wasser-WP-Kreislauf			WP-Leistungsaufnahme	Heizkreislauf				Leistungszahl
in min.	$T_{\text{Ein.Sole}}$ in °C	$T_{\text{Aus.Sole}}$ in °C	V_{Sole} in l/min	P_{el} in kW	T_{Vorlauf} in °C	$T_{\text{Rücklauf}}$ in °C	$\dot{m}_{\text{Wasser}}$ in kg/min	Q_h in kW	COP-Zahl [-]
210	-5,0	-7,5	22,1	1,47	34,9	30,1	15,5	5,16	3,5
320	0,0	-3,5	21,6	1,55	35,0	29,7	16,8	6,17	4,0
225	4,9	1,4	23,5	1,62	35,2	29,1	16,9	7,10	4,4
300	9,9	5,4	22,2	1,62	35,3	28,5	17,3	8,10	5,0
150	14,9	7,4	14,7	1,64	35,0	28,0	19,3	9,31	5,7
200	19,7	12,0	15,0	1,66	35,0	28,1	19,2	9,28	5,6
160	24,8	17,1	15,4	1,68	35,3	28,1	19,1	9,43	5,6
120	30,3	22,6	15,8	1,72	35,0	28,2	20,4	9,68	5,6
300	-5,3	-7,8	22,2	1,69	45,1	40,9	16,7	4,85	2,9
360	0	-3,0	21,2	1,79	45,0	40,0	16,9	5,90	3,3
330	5,1	1,6	21,7	1,85	45,1	39,3	16,8	6,79	3,7
320	10,2	5,7	20,8	1,89	45,2	38,5	16,9	7,84	4,2
135	15,0	7,9	14,7	1,95	45,0	38,0	18,1	8,75	4,5
180	20,1	12,4	15,2	2,01	45,2	38,2	19,9	9,70	4,8
210	25,4	17,7	15,7	2,02	44,7	37,7	20,1	9,91	4,9
155	30,2	22,3	16,1	2,08	44,9	37,9	20,8	10,20	4,9

Tabelle 38: Messergebnisse bei minimaler Leistungsaufnahme (Pe, min)

Messdauer	Sole/Wasser-WP-Kreislauf			WP-Leistungsaufnahme	Heizkreislauf				Leistungszahl
in min.	T _{Ein} Sole in °C	T _{Aus} Sole in °C	V Sole in l/min	Pe in kW	T Vorlauf in °C	T Rücklauf in °C	m _{Wasser} in kg/min	Qh in kW	COP-Zahl [-]
170	-5,0	-7,2	7,5	0,45	35,1	33,5	14,3	1,52	3,4
180	-0,2	-3,2	6,8	0,44	35,0	33,5	17,2	1,80	4,1
165	5,2	1,6	7,1	0,44	35,1	33,3	17,2	2,14	4,9
165	10,1	5,8	7,1	0,43	35,0	32,9	17,2	2,47	5,7
160	15,1	10,1	7,2	0,42	35,3	32,9	16,5	2,80	6,7
175	20,1	14,3	7,1	0,40	35,1	32,4	16,5	3,15	7,9
170	25,1	18,6	7,3	0,37	35,0	31,9	16,5	3,51	9,4
170	29,9	22,6	7,3	0,35	35,2	31,9	17,1	3,90	11,1
170	-5,1	-7,4	5,2	0,51	45,0	43,9	17,2	1,29	2,5
155	0,0	-3,1	5,5	0,53	45,1	43,8	17,1	1,57	3,0
200	5,1	1,4	5,7	0,54	45,1	43,6	17,2	1,87	3,5
180	10,1	5,8	6,0	0,54	45,0	43,1	17,1	2,21	4,1
150	15,1	10,1	6,2	0,53	45,0	42,9	17,1	2,55	4,8
190	19,7	13,8	6,2	0,52	45,1	42,7	17,3	2,91	5,6
180	24,9	18,3	6,4	0,51	45,1	42,3	17,3	3,30	6,5
200	30,2	23,0	6,7	0,49	45,0	41,9	17,3	3,70	7,6

Ergänzend zeigen Abbildung 143 sowie Abbildung 144 die Zusammenhänge zwischen Sole-Eintrittstemperatur, Heizleistung, elektrischer Leistungsaufnahme und Leistungszahl für die untersuchten Vorlauftemperaturniveaus.

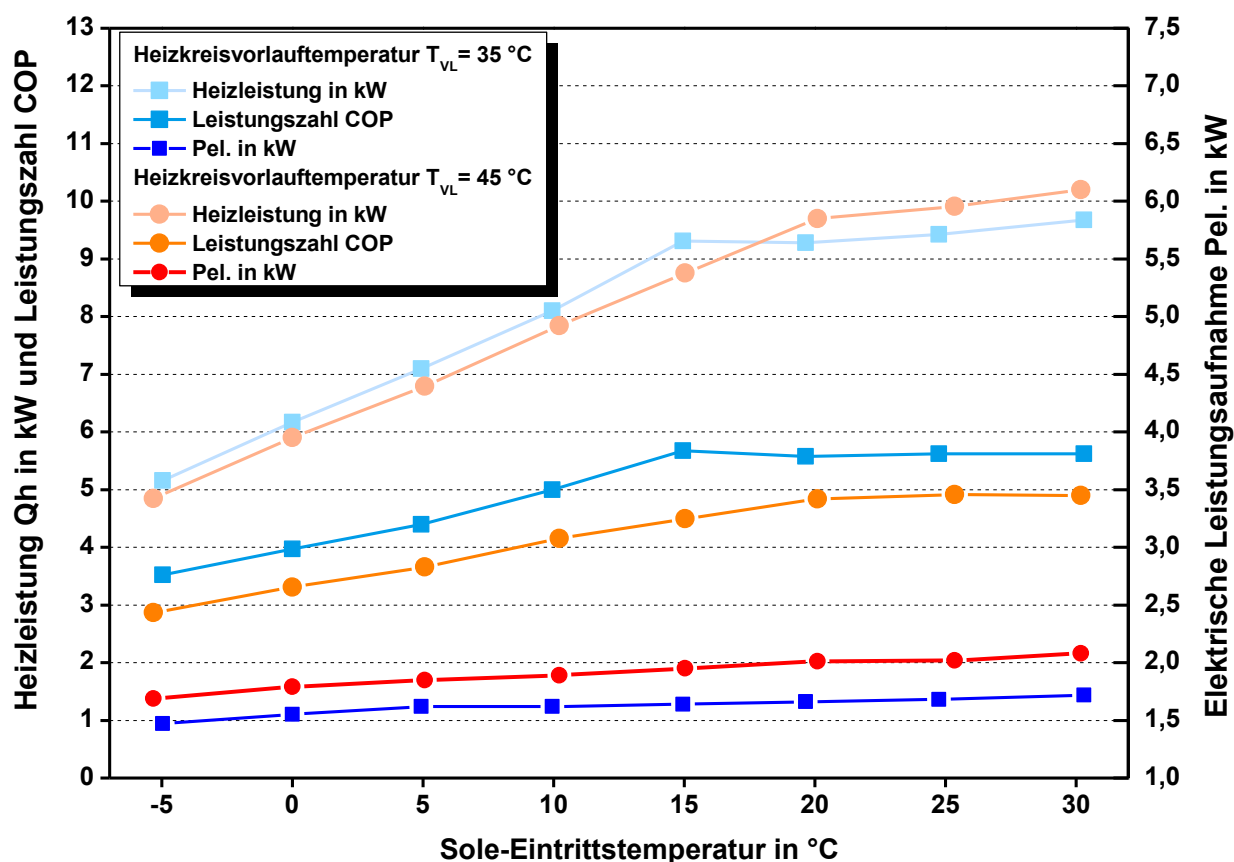


Abbildung 143: Kennfelder für Heizkreisvorlauftemperaturen von 35 °C und 45 °C

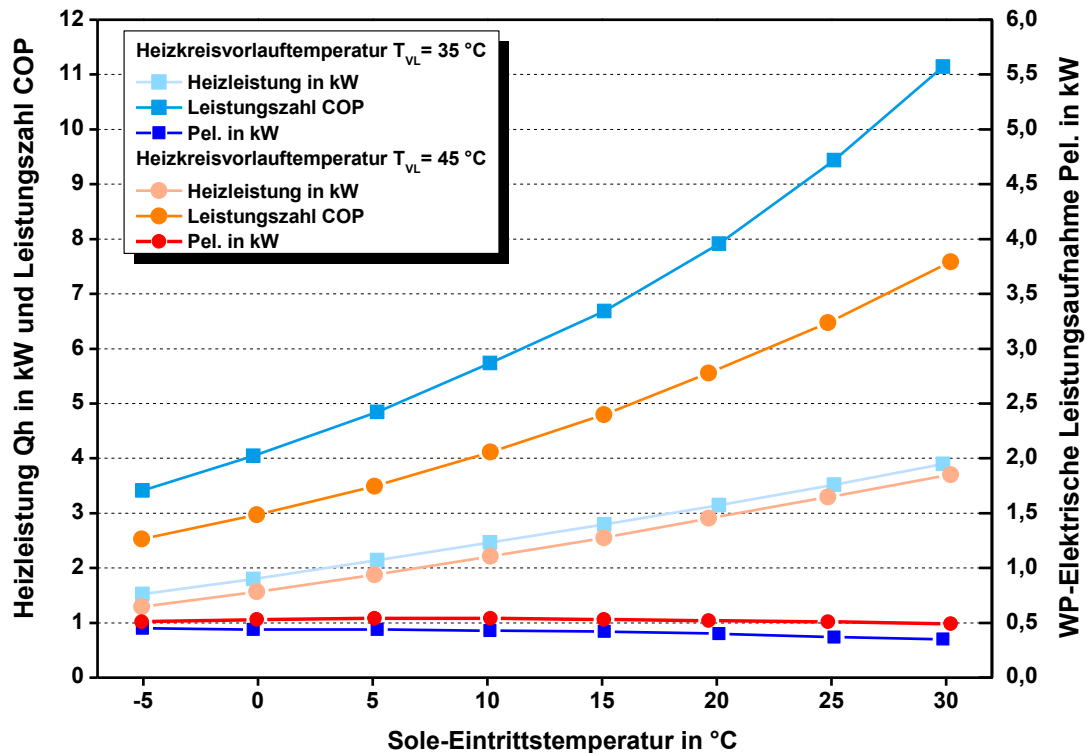


Abbildung 144: Kennfelder für Heizkreisvorlauftemperaturen von 35 °C und 45 °C bei $P_{e, \min}$

Damit wird sehr anschaulich belegt, wie stark die Effizienz der Wärmepumpe vom Temperaturniveau der Wärmequelle und vom geforderten Heizkreisliveau abhängt. Gerade im Zusammenhang, mit dem in AP 2.2 untersuchten Niedertemperaturbetrieb ist, dies wesentlich, weil sich nur bei abgesenkten Vorlauftemperaturen die systemischen Effizienzvorteile einer Wärmepumpe konsequent erschließen lassen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Arbeitspakets lag auf der Untersuchung des dynamischen Verhaltens. Dieses ist in Abbildung 145 zusammengefasst.

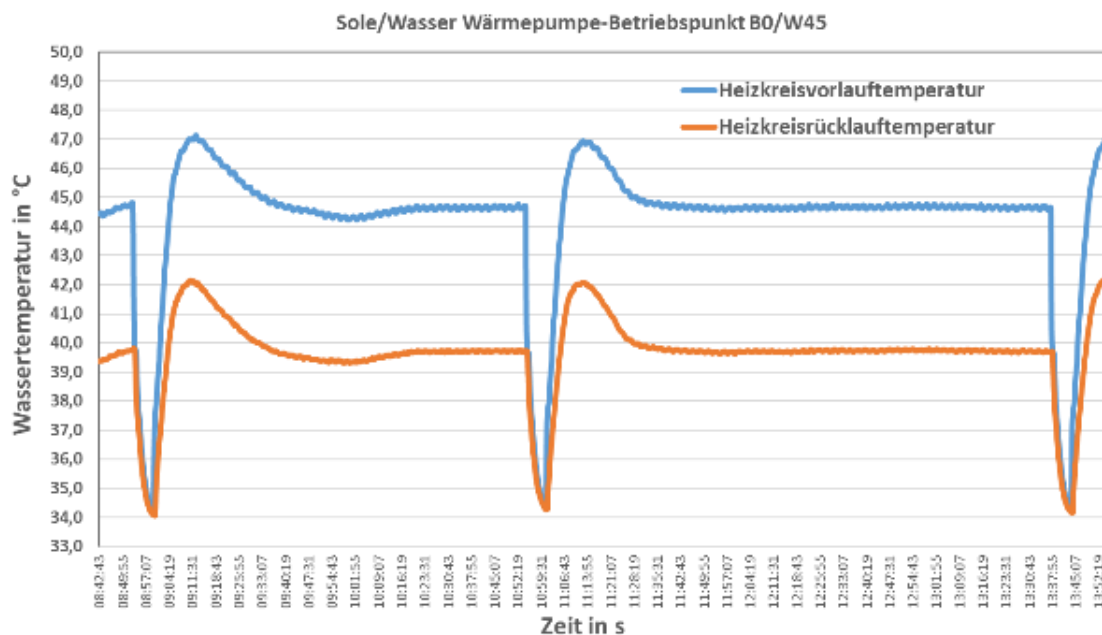


Abbildung 145: Exemplarische Darstellung der dynamischen Untersuchungen

Die Bedeutung dieser Untersuchungen liegt darin, dass die Wärmepumpe im EnQM-Kontext nicht als isoliertes Einzelgerät, sondern als Bestandteil eines dynamisch betriebenen Gesamtsystems betrachtet wird. Für die Bewertung ist daher nicht nur die stationäre Leistungsfähigkeit entscheidend, sondern auch das Verhalten bei veränderlichen Randbedingungen und im Zusammenspiel mit Wärmeübergabe, Speicher- und Regelungskomponenten.

Aufbauend auf den Prüfstandsuntersuchungen wurde die vermessene Wärmepumpe unter Verwendung der am E.ON Research Center der RWTH Aachen entwickelten offenen Modelica-Bibliothek AixLib modelliert. Dies ist in Abbildung 146 dargestellt. Das Modell wurde mit dem gemessenen Kennfeld parametrisiert und anhand der Messdaten validiert. Als Eingangsgrößen dienen die Soleeintrittstemperatur, die Heizkreistrücklauftemperatur sowie die Massenströme der Fluide; als Ausgangsgrößen werden die elektrische Leistung, die Heizleistung, die Soleaustrittstemperatur und die Heizkreisvorlauftemperatur berechnet. Damit wurde eine belastbare Simulationskomponente geschaffen, die über die rein experimentelle Untersuchung hinausgeht und in die weiteren Gebäude- und Quartiersmodelle integriert werden kann.

Die Validierung des Modells ist in Abbildung 147 sowie Abbildung 148 dokumentiert. Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messpunkten für die einstellenden Zustände bei unterschiedlichen Soleeintrittstemperaturen. Die geringen Abweichungen der Soleaustrittstemperaturen werden auf Messungenauigkeiten zurückgeführt. Die Wärmepumpe wurde nicht nur vermessen, sondern in einer Form abgebildet, die für die Simulation des dynamischen Betriebs in Einzelgebäuden und im Quartier nutzbar ist. Das Modell kann sowohl in die dynamischen Gebäudemodelle als auch in das Quartiersmodell integriert und außerdem in AP 2.2 genutzt werden, um den kombinierten Betrieb von Fußbodenheizung und Wärmepumpe simulationsgestützt zu untersuchen.

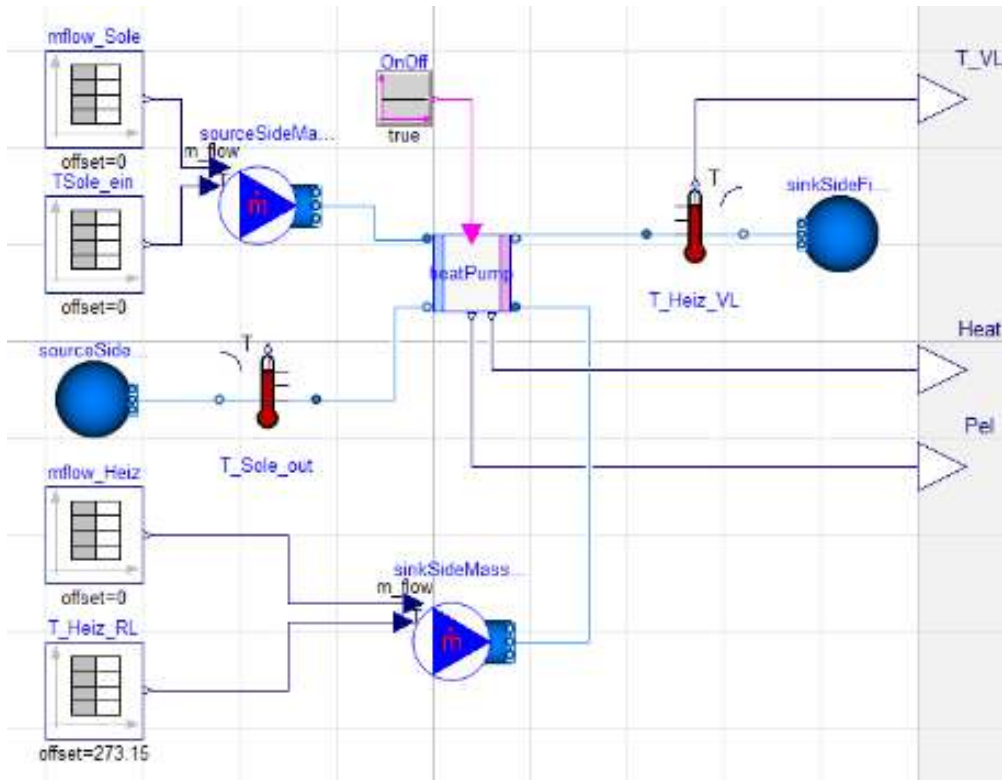


Abbildung 146: Modell der Wärmepumpe in Dymola

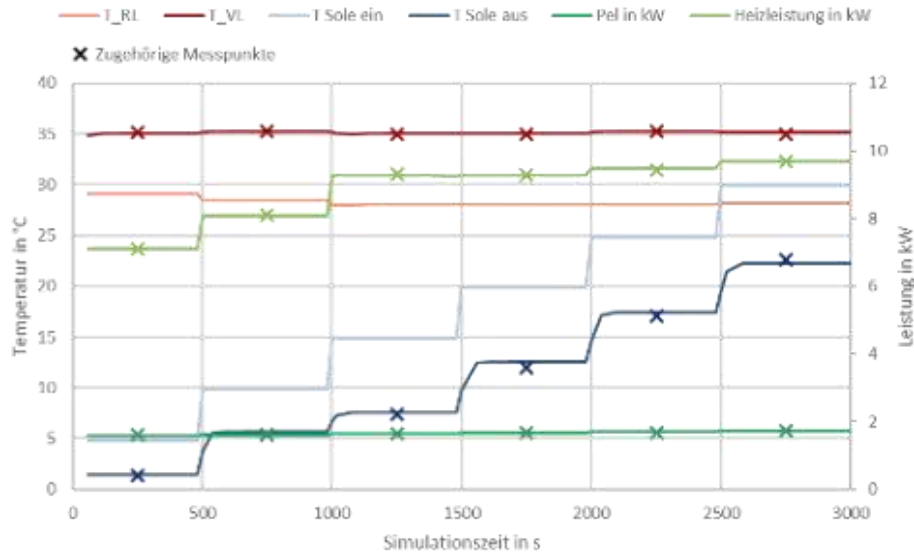


Abbildung 147: Vergleich Simulation und Messpunkte für eine Heizkreisvorlauftemperatur von 35 °C

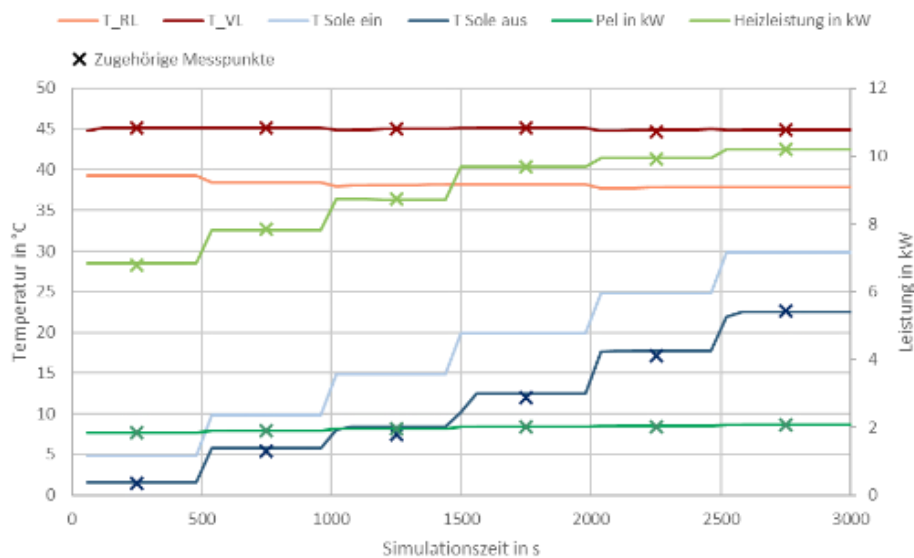


Abbildung 148: Vergleich Simulation und Messpunkte für eine Heizkreisvorlauftemperatur von 45 °C

Über die Prüfstands- und Modellierungsarbeiten hinaus hatte AP 2.3 ausdrücklich auch die Aufgabe, geeignete Wohneinheiten für die Integration von Wärmepumpen zu identifizieren. Es wurden zunächst der Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit Flachkollektoren untersucht. Dafür wurde angenommen, dass die Erdwärme über Flachkollektoren bereitgestellt wird, um aufwendige Genehmigungen und Tiefenbohrungen zu vermeiden. Zur Abschätzung der verfügbaren Grundstücksflächen wurden in QGIS die Freiflächen zwischen den Gebäuden ermittelt, den angrenzenden Gebäuden zugeordnet und mit einem Reduktionsfaktor versehen, der konkurrierende Nutzungen berücksichtigt. Die erforderliche Kollektorfläche wurde überschlägig mit einer Faustformel bestimmt, wonach die benötigte Fläche mindestens das Eineinhalb- bis Zweifache der zu beheizenden Wohnfläche betragen soll. Die Ergebnisse sind in Abbildung 149 dargestellt.



Abbildung 149: Gebäude, die mit Wärmepumpe und Flachkollektoren ausgestattet werden können

Danach ergeben sich im Quartier lediglich 34 potenziell geeignete Gebäude; hiervon ist nur ein Gebäude ein Mehrfamilienhaus mit drei Wohnungen, während alle übrigen geeigneten Gebäude Einfamilienhäuser sind. Das Potenzial für Wärmepumpen mit Flachkollektoren im Quartier ist insgesamt gering und zusätzlich wird die Akzeptanz der Bewohner als gering eingeschätzt, da für die Verlegung großflächig bestehende Gartenflächen aufgedeckt werden müssten.

Vor diesem Hintergrund wurden im weiteren Verlauf Erdsonden als alternative Wärmequelle betrachtet. Diese benötigen deutlich weniger Fläche, da sie als vertikale Erdwärmetauscher ausgeführt werden. Die Annahmen für die Eignungsbewertung sind in Kapitel II.6.3.1.3.5 aufgeführt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 150.



Abbildung 150: Das Potential auf der Margarethenhöhe, Gebäude mit Wärmepumpe und Erdsonden auszustatten

Danach sind mit 535 Gebäuden deutlich mehr Objekte potenziell für Wärmepumpen mit Erdsonden geeignet als für die Variante mit Flachkollektoren. Zugleich ist darauf hinzuweisen, dass diese Abschätzung aufgrund der verwendeten Vereinfachungen mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 2.3 damit als ein zentrales Verknüpfungspaket zwischen Systementwicklung, Simulationsmodellierung und quartiersbezogener Umsetzungsstrategie einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens experimentell, dass die ausgewählte Mikrowärmepumpe unter den für das Projekt relevanten Randbedingungen belastbar charakterisiert werden kann; zweitens stellt es mit dem in Dymola implementierten und validierten Modell ein methodisch tragfähiges Werkzeug für die weitere dynamische Systemsimulation bereit; und drittens überführt es die technologische Betrachtung in eine räumliche Potenzialabschätzung für das Quartier. Besonders wesentlich ist dabei die Erkenntnis, dass der Einsatz von Wärmepumpen im denkmalgeschützten Bestand nicht allein eine Frage der Geräteeffizienz ist, sondern maßgeblich von der Wärmequelle, den verfügbaren Flächen, den genehmigungsrechtlichen Randbedingungen sowie der Kombinierbarkeit mit LowEx-Wärmeübergabesystemen abhängt. AP 2.3 schafft damit die belastbare Grundlage für die weitere Vertiefung der erneuerbaren Energieversorgung im Projekt.

AP 2.4.1 hatte die Aufgabe, die werkstoffliche und konstruktive Grundlage für einen thermisch und elektrisch aktivierten Dachstein in denkmalverträglicher Geometrie zu schaffen. Ziel war die Entwicklung eines multifunktionalen Dachsteins, der Strom und Wärme erzeugen kann und dabei sowohl rein elektrisch als auch rein thermisch oder in gekoppelter Form betrieben werden kann.

Der Schwerpunkt lag damit auf der material- und fertigungstechnischen Entwicklung des Dachsteins selbst, einschließlich Rezeptur, Farbgebung, Integration der funktionalen Komponenten und mechanisch-thermischer Absicherung. Das Arbeitspaket bildet damit die werkstofflich-konstruktive Basis für die nachfolgenden elektrischen und systemtechnischen Entwicklungen in AP 2.4.2.

Ausgangspunkt war die Weiterentwicklung der Dachsteinrezeptur in enger Abstimmung mit dem Hersteller Autarq. Produktionsbegleitende Versuche in der Fertigungsstätte in Prenzlau ermöglichten die Übertragung der im Labor entwickelten Mischungen in den großtechnischen Fertigungsablauf. Dabei zeigte sich, dass trotz baugleicher Mischer an den Standorten Stuttgart und Prenzlau geringfügige Anpassungen der Rezeptur erforderlich waren, um die für die Produktion notwendige selbstverdichtende Konsistenz und Selbstentlüftung des Feinkornbetons zu gewährleisten. Insbesondere die nahezu vollständige Beseitigung oberflächennaher Lufteinschlüsse durch erhöhte Entschäumerzugabe war von Bedeutung, weil dadurch nicht nur die Oberflächenqualität verbessert, sondern auch die Dauerhaftigkeit erhöht wurde. Die Rezepturentwicklung war damit nicht allein eine Frage der Verarbeitbarkeit, sondern unmittelbar mit den Anforderungen an Frostbeständigkeit, Oberflächenqualität und Fertigungssicherheit verknüpft.

Ein weiterer zentraler Aspekt war die Abstimmung der Frischbetoneigenschaften mit dem Produktionsprozess. Es wurde deutlich, dass sich die Eigenschaften des Feinkornbetons über einen Zeitraum von etwa 30 Minuten nur sehr begrenzt verändern durften, um ein fehlerfreies Füllen der Schalungen sicherzustellen. Gleichzeitig war für die schnelle Entschalbarkeit eine rasche Festigkeitsentwicklung gefordert. Daraus ergab sich ein materialspezifischer Zielkonflikt zwischen ausreichender Verarbeitungszeit, schneller Erhärtung und der Vermeidung hydratationsbedingter Gefügestörungen. Beschleuniger, Entschäumer, Wasser- und Fließmittelmengen mussten daher aufwendig aufeinander abgestimmt werden. Diese Zusammenhänge sind für die Bewertung des Arbeitspakets wesentlich, weil sie zeigen, dass die Entwicklung des Dachsteins nicht nur funktional, sondern auch prozesstechnisch auf die Serienfertigung ausgerichtet war.

Von besonderer Relevanz für den Einsatz im denkmalgeschützten Quartier war die farbliche Anpassung der Dachsteine. Im Projekt wurde geprüft, ob statt einer Beschichtung eine durch Pigmente erzeugte Durchfärbung des Dachsteins möglich ist. Erste Versuche mit erdfarbenen Pigmenten verliefen positiv; für die im Vorhaben geforderte dunkelgraue Farbtönung erwies sich eine ausreichende Durchfärbung mit praxisgerechten Pigmentmengen jedoch als nicht realisierbar. Auch Versuche mit Rußpigmenten führten nach natürlicher Bewitterung nicht zu einer langfristig stabilen und gleichmäßigen Farbtönung. Es wurde folgerichtig geschlossen, dass für ein marktgerechtes, dauerhaft einheitliches Erscheinungsbild die aus der Dachsteinindustrie bekannten Beschichtungssysteme vorzuziehen sind. Damit wird deutlich, dass die Denkmalverträglichkeit nicht allein geometrisch, sondern auch materialästhetisch bearbeitet wurde.

Parallel dazu wurde die Integration der photovoltaischen Aktivierung weiterentwickelt. Aufgrund der gewellten Geometrie der im Quartier vorhandenen Dachsteine mussten sowohl die Dachsteinform als auch die Ausbildung der Solarmodule angepasst werden. Es wurden drei Lösungsansätze weiterverfolgt: die Abdeckung mehrerer Einzelzellen durch ein gemeinsames angepasstes Glas, die Biegung einzelner Zellen mit gemeinsamer gebogener Glasabdeckung sowie den Einsatz gebogener Dünnschichtmodule auf CIGS-Basis. Letztere erwiesen sich insbesondere deshalb als vielversprechend, weil sie sich konstruktiv in die dreidimensionale Schalung einbetten lassen. Der Verbund zwischen Feinkornbeton und CIGS-Modul wurde durch eine polymergebundene und abgesandete Rückseite des Moduls verbessert; erste Verbundprüfungen an Versuchsmustern verliefen positiv. Damit wurde eine Lösung entwickelt, die sowohl die elektrische Aktivierung als auch die Einbindung in einen betontechnisch herstellbaren Dachstein ermöglicht.

Eine grundlegende Randbedingung der Entwicklung war, dass der neue Hybrid-Dachstein trotz zusätzlicher Funktionen das Gewicht des im Quartier vorhandenen Standarddachsteins nicht überschreiten durfte. Nur so konnte der originale hölzerne Dachstuhl einschließlich Lattung ohne zusätzliche statisch-konstruktive Ertüchtigung erhalten bleiben. Die geometrische Grundlage hierfür wurde durch das dreidimensionale Scannen eines Originaldachsteins geschaffen. Das daraus abgeleitete Abbildung 151 zeigt nicht nur die Geometrie des Dachsteins, sondern insbesondere die örtliche Verteilung der Materialdicken. Diese Informationen waren für die weitere konstruktive Entwicklung zwingend erforderlich, weil nur auf dieser Basis die Aufnahme thermischer und elektrischer Komponenten innerhalb des bestehenden Volumen- und Gewichtsbudgets geplant werden konnte.

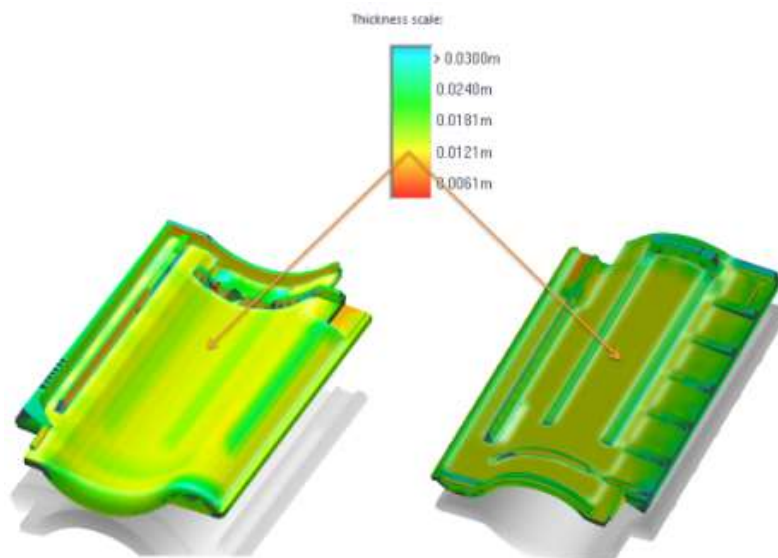


Abbildung 151: 3D-CAD-Modell mit farbiger Darstellung der räumlichen Verteilung der Dachsteindicke

Für die thermische Aktivierung wurde zunächst Variante 1 entwickelt, bei der Kupferrohre als Wärmetauscher im Dachstein integriert werden. Das Grundprinzip war, die Wärmetauscher auf der Unterseite des Dachsteins anzuordnen, um oberseitig Platz für die photovoltaische Aktivierung zu erhalten. Ausgangspunkt dieser Entwicklung war das in Abbildung 152 dargestellte Konzept eines mäandrierenden Kupferrohres. Die montagebezogene Einbindung in den Dachstein wird in Abbildung 153 gezeigt. Da sich bei diesem Ansatz größere kontaktlose Bereiche zwischen Kupferrohr und Betonkorpus ergaben, wurden weitere Subvarianten untersucht, um die Wärmeübertragungsfläche zu vergrößern.



Abbildung 152: S-förmiges Kupferrohr (Subvariante 1a)

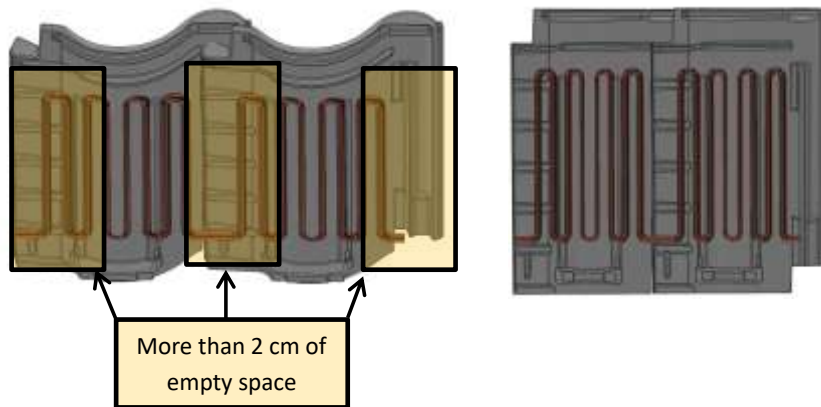


Abbildung 153: Integration von Rohren in den Dachsteinen (Konzept 1a)

Die weiteren Entwicklungsstufen dieses Konzepts werden in Abbildung 154 und Abbildung 155 dargestellt.

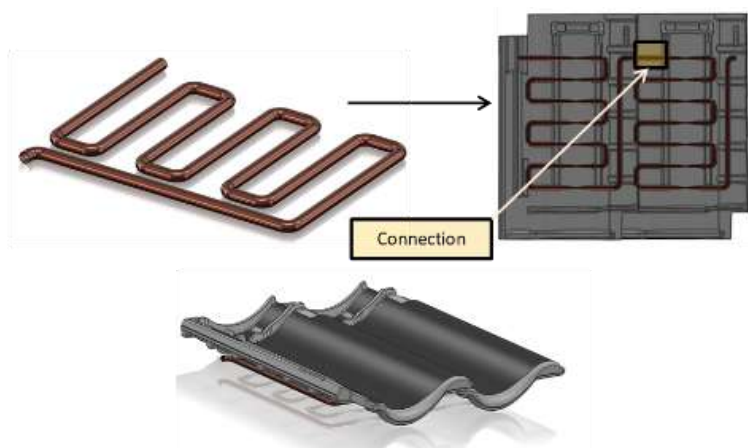


Abbildung 154: Subvariante 1b; Kupferrohre (oben links); Integration von Rohren (oben rechts); Dachstein (unten)

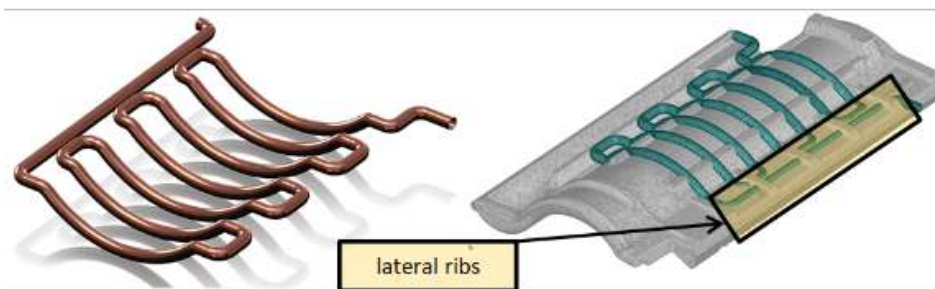


Abbildung 155: Subvariante 1c; gekrümmt gebogenes Kupferrohr (links), Integration des Kupferrohrs in den Dachsteinkorpus (rechts)

Während in Subvariante 1b die Rohrausrichtung um 90 Grad gedreht wurde und damit bereits eine Vergrößerung der Kontaktfläche erreicht werden konnte, folgt das in Subvariante 1c verwendete gebogene U-förmige Kupferrohr dem Krümmungsradius der Dachsteinunterseite und wird zusätzlich durch seitliche Rippen geführt. Dadurch konnte die Kontaktfläche des Wärmetauschers auf 97 % erhöht werden. Abbildung 156 verdeutlicht die drei Lösungen zusammenfassend und stellt gleichzeitig Geometrie, Einbettung und zugehörige Dachsteingewichte gegenüber. Die Abbildung zeigt damit sehr anschaulich den Zielkonflikt zwischen thermischer Leistungsfähigkeit, geometrischer Einpassung und zusätzlichem Gewicht.

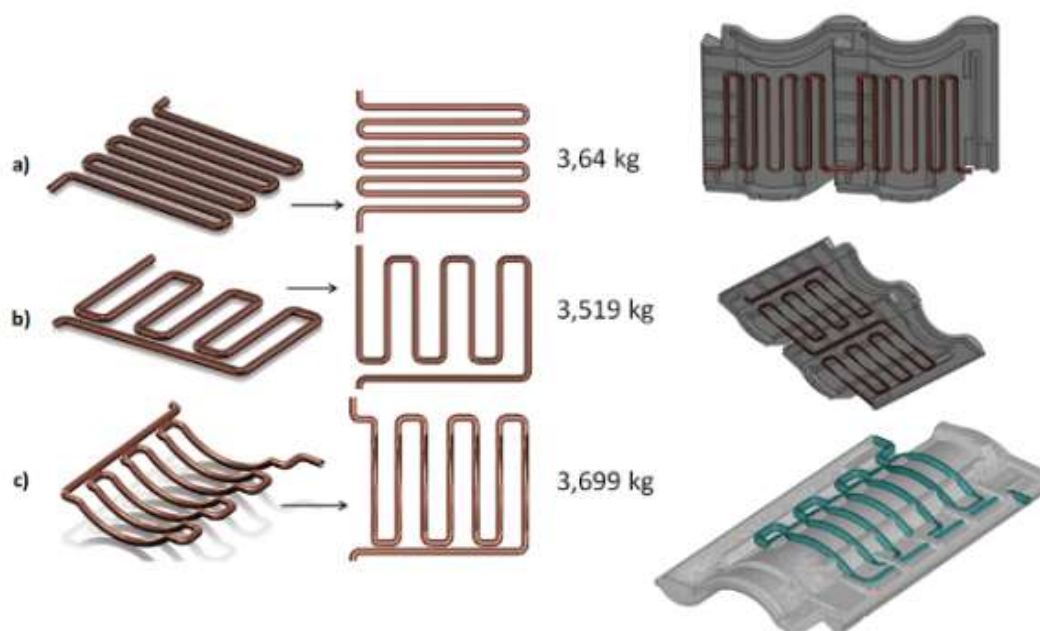


Abbildung 156: Vergleich der vorgeschlagenen Subvarianten des Wärmetauscherkonzepts beim Einsatz von planar und gekrümmt geformten Kupferrohren – Geometrie des Kupferrohres, Einbettung des Wärmetauschers in den Dachsteinkorpus aus Feinkornbeton sowie Angabe der zugehörigen Dachsteingewichte

Die ökonomische Bewertung dieser drei Kupferrohrvarianten ist in Tabelle 39 zusammengefasst. Tabelle 39 zeigt, dass die wirkungsgradseitig attraktivste Lösung, also Subvariante 1c, zugleich deutlich höhere Herstellungskosten verursacht als die einfacheren Varianten 1a und 1b. Die Herstellungskosten der gebogenen Rohre bei dieser Lösung etwa um den Faktor drei höher liegen.

Tabelle 39: Vergleich von Kupferpreis und Herstellpreis für gebogenes Kupferrohr

Kupferrohre	Subvariante 1a	Subvariante 1b	Subvariante 1c
Gewicht [g]	420	270	379
Preis Cu [€]	2,16	1,39	1,95
Herstellpreis [€/Meter Rohrlänge]	2	2	6
			5,14 €/kg Cu

Damit wurde deutlich, dass der Einsatz von Kupferrohren zwar thermisch günstig, wirtschaftlich jedoch nur begrenzt tragfähig ist. Gerade diese Gegenüberstellung aus Abbildung 156 und Tabelle 39 begründet den Übergang zu einem alternativen Wärmetauscherkonzept.

Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit Noventec Variante 2 entwickelt, bei der anstelle von Kupferrohren ein polymerbasierter Twin-Channel-Wärmetauscher in den Feinkornbeton integriert wird. Das Grundprinzip ist in Abbildung 157 dargestellt; Abbildung 158 zeigt die geometrischen Abmessungen der Einbaukomponente.

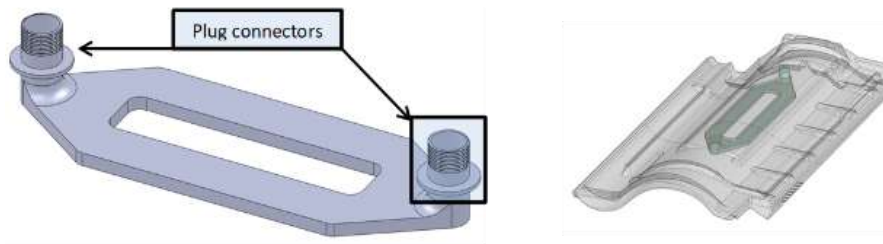


Abbildung 157: Twin-Channel-Lösung mit Steckverbindern und Gewinden (links); eingebetteter Tunnel im Dachstein (rechts)

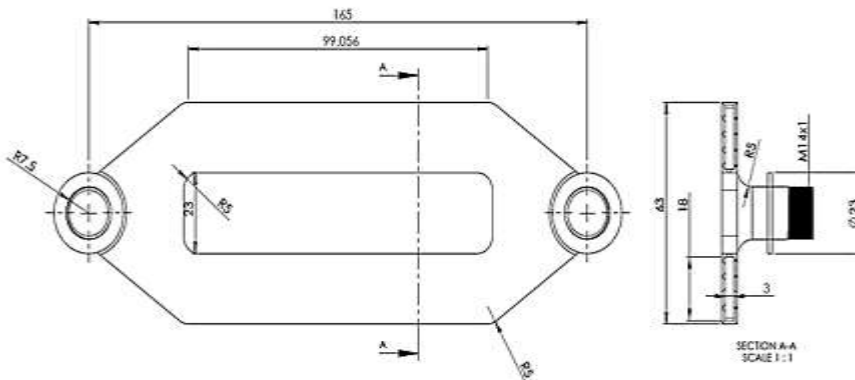


Abbildung 158: Abmessung der Twin-Channel-Lösung zur thermischen Aktivierung des Dachsteins

Die Entwicklung zielte darauf ab, den Materialeinsatz zu reduzieren und gleichzeitig die thermische Aktivierung wirtschaftlicher zu gestalten. Für die Verlegefähigkeit auf dem Bestandsdach mussten dabei zwei geometrische Randbedingungen eingehalten werden, nämlich definierte Abstände der Einbaukomponente zur Ober- und Unterseite des Dachsteins. Damit blieb die Dachsteinentwicklung konsequent an den Anforderungen des realen Bestands orientiert.

Die unterschiedlichen geometrischen Ausführungen der Twin-Channel-Komponente wurden anschließend simulativ untersucht. Abbildung 159 zeigt die in den Simulationen berücksichtigten Varianten.

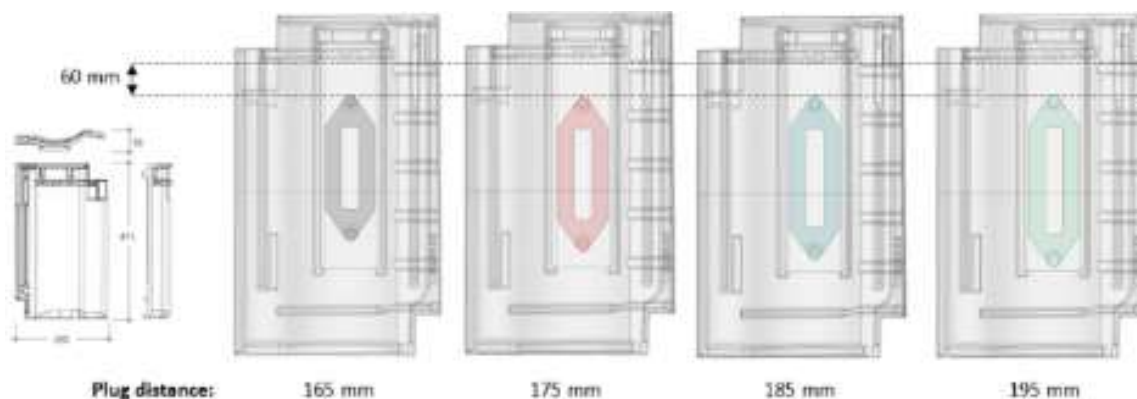


Abbildung 159: Geometrie der in den Simulationen berücksichtigten Dachsteingeometrien mit unterschiedlich langen Twin-Channel-Komponenten

Um die Auswirkungen auf Tragfähigkeit und thermische Leistungsfähigkeit zu bestimmen, wurden FEM- und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die mechanischen Randbedingungen des diskretisierten Dachsteinmodells sind in Abbildung 160 dargestellt; Abbildung 161“ verdeutlicht die Einbettung der Channels in den Feinkornbeton.

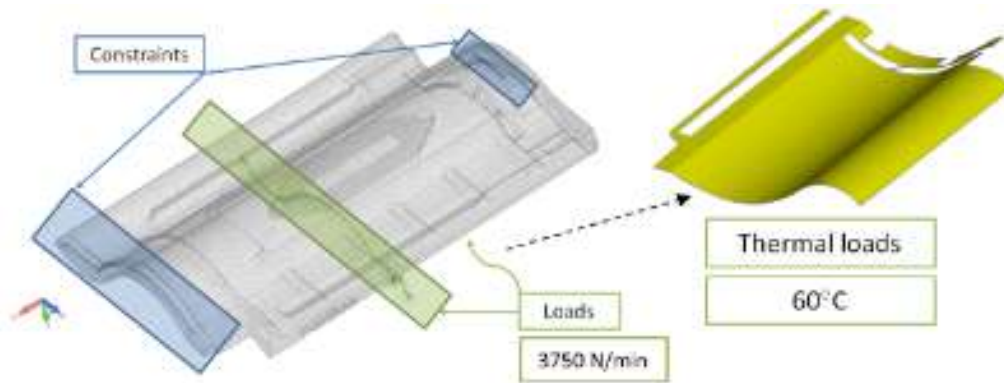


Abbildung 160: Diskretisiertes Dachsteinmodell mit den mechanischen und thermischen Randbedingungen

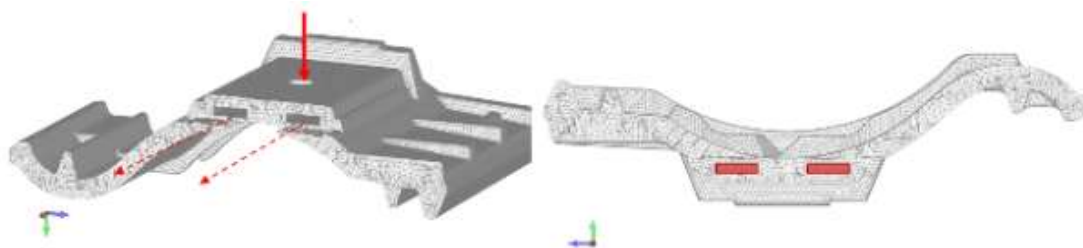


Abbildung 161: Ansicht und Querschnitt des diskretisierten Dachsteinmodells mit der integrierten Twin-Channel-Komponente

Die Last-Verformungs-Kurven der untersuchten Varianten werden in Abbildung 162 zusammengeführt. Hieraus geht hervor, dass zwar Unterschiede zwischen den Varianten bestehen, die Mindesttragfähigkeit nach DIN EN 490/491 jedoch von allen untersuchten Lösungen eingehalten wird. Der gerissene Dachstein nach Überschreiten der maximalen Dehnung ist in Abbildung 163 dokumentiert.

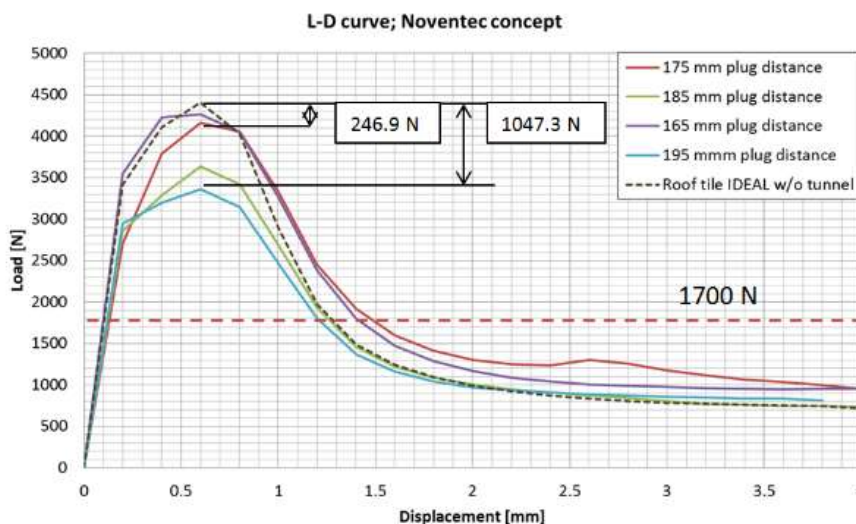


Abbildung 162: LD-Kurve (Last – Verschiebung Kurve) für verschiedene Fälle (Konzept 2)

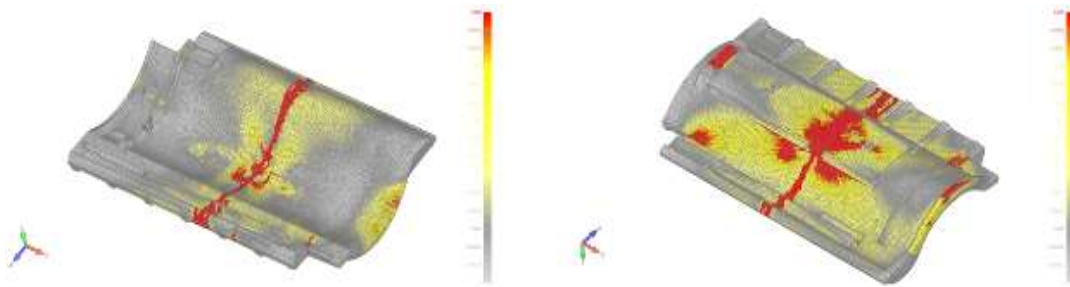


Abbildung 163: Darstellung der gerissenen Ober- und Unterseite des Dachsteins nach Überschreiten der maximalen Dehnung

Neben der statisch-konstruktiven Eignung wurde auch das thermische Verhalten der Twin-Channel-Lösung numerisch untersucht. Die hierfür angesetzten Randbedingungen sind in Abbildung 164 dargestellt.



Abbildung 164: Thermische Randbedingungen der CFD-Simulation an der Ober- und Unterseite des Dachsteins und Eintrittstemperatur des wärmeaufnehmenden und -abführenden Fluids (Wasser-Glykol-Gemisch)

Die CFD-Simulationen zeigen in Abbildung 165 sowie in Abbildung 166 , dass sich das Wärmeträgerfluid bei Hintereinanderschaltung mehrerer Dachsteine nahezu linear erwärmt. Zugleich wird erläutert, dass sich dieser Verlauf mit zunehmender Annäherung an die Temperatur des Betonkorpus in einen parabolischen Trend überführen würde. Diese Untersuchungen belegen, dass die Twin-Channel-Lösung nicht nur konstruktiv realisierbar, sondern auch thermisch funktionsfähig ist.

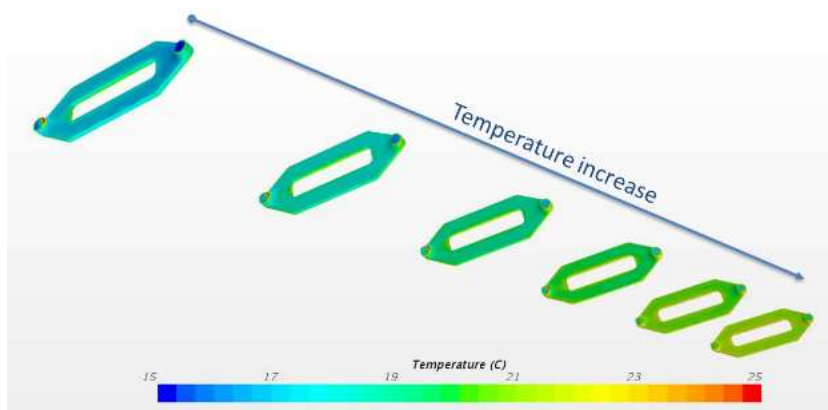


Abbildung 165: Temperaturerhöhung der Flüssigkeit pro Betondachstein (3D-Ansicht)

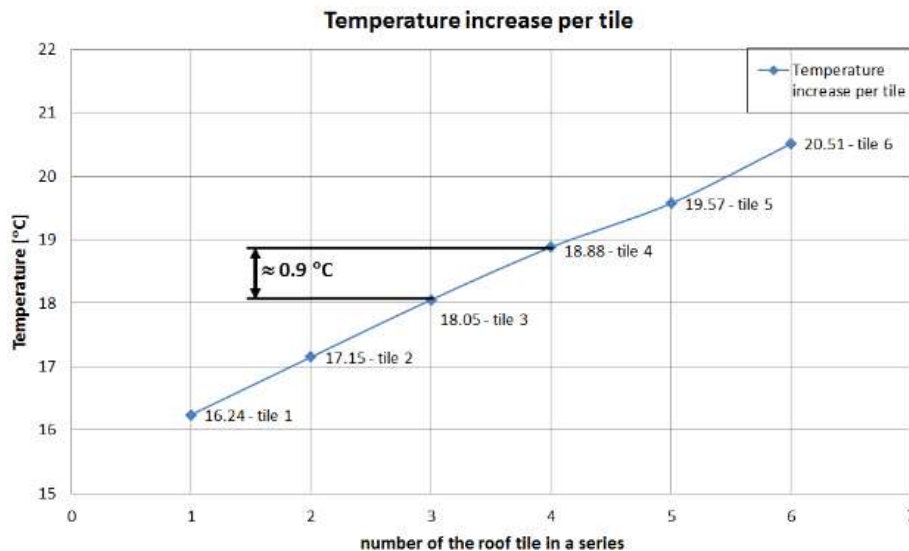


Abbildung 166: Temperaturzunahme des Wärmetauscherfluid längs der hintereinander geschalteten Dachsteine

Nachdem das Konzept statisch und thermisch abgesichert war, erfolgte die Überführung in die Prototypenfertigung. Abbildung 167 zeigt die additiv gefertigten Wärmetauscher mit montierten Anschlüssen. Darauf aufbauend wurde eine Schalung entwickelt, die in Abbildung 168 dargestellt ist.



Abbildung 167: Im 3D-Druck hergestellte Twin-Channel-Wärmetauscher mit montierten, drehbaren Anschlüssen für die Leitungen



Abbildung 168: Unterseite der Schalung für den Betondachstein mit montiertem Twin-Channel-Wärmetauscher in der Mitte

Mit dieser Schalung konnte ein Hybrid-Dachstein aus pigmentiertem selbstverdichtendem Feinkornbeton hergestellt werden. Abbildung 169 dokumentiert den so gefertigten Baustein mit integrierter thermischer und elektrischer Aktivierung.



Abbildung 169: Unterseite mit Wärmetauscher und Oberseite mit CIGS-Modul des Betondachsteins

Den unmittelbaren Vergleich zwischen dem entwickelten Hybrid-Dachstein und einem im Quartier verwendeten Standardziegel zeigt schließlich Abbildung 170.



Abbildung 170: Betondachstein mit Twin-Channel-Wärmetauscher und CIGS-PV-Modul (links) neben einem im Quartier eingesetzten Standardziegel

Diese Abbildung hat für das Arbeitspaket eine besondere Bedeutung, weil sie die erfolgreiche Überführung von der Werkstoff- und Simulationsentwicklung in einen realen, denkmalverträglich anmutenden Prototypen sichtbar macht.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 2.4.1 damit als zentrales werkstoffliches Entwicklungsarbeitspaket innerhalb von Teilprojekt 2 einzuordnen. Es wurde gezeigt, dass ein thermisch und elektrisch aktivierter Dachstein in denkmalverträglicher Geometrie grundsätzlich herstellbar ist, wenn Rezeptur, Oberflächenqualität, Farbgebung, Gewichtsoptimierung und Komponentenintegration gemeinsam bearbeitet werden. Die Kupferrohrlösung erwies sich als thermisch günstig, wirtschaftlich jedoch nur eingeschränkt tragfähig; die weiterentwickelte Twin-Channel-Lösung stellte demgegenüber einen überzeugenden Kompromiss aus Funktionsfähigkeit, Gewicht, Fertigbarkeit und Kostenperspektive dar.

AP 2.4.2 baut unmittelbar auf den werkstofflich-konstruktiven Entwicklungen aus AP 2.4.1 auf. Nachdem dort die geometrische, materialtechnische und thermische Aktivierung des Hybrid-Dachsteins entwickelt wurde, richtet sich der Fokus nun auf die photovoltaische Aktivierung sowie auf die dafür erforderliche Leistungselektronik. Ziel des Arbeitspakets war die Optimierung der

Energieeffizienz durch die anwendungsspezifische Planung eines integrierbaren Systems auf Basis eines effizienten DC-DC-Konverters für intelligente PV-Dachziegel. Hierfür wird ausdrücklich die Entwicklung eines speziell angepassten Konverters, die Entwicklung eines an die Anwendung angepassten Maximum Power Point Trackers (MPPT), die Funktionalitätserweiterung des leistungselektronischen Systems sowie ein Pflichtenheft für eine spätere ASIC-Integration als zentrale Arbeitsschritte empfohlen. AP 2.4.2 übernimmt damit innerhalb von AP 2.4 die Aufgabe, die werkstofflich entwickelte Dachsteinlösung elektrisch so zu ertüchtigen, dass sie unter realen Randbedingungen effizient in ein Gebäudesystem eingebunden werden kann.

Ein erster Schwerpunkt lag auf der Frage, ob und in welchem Umfang eine MPPT-basierte Betriebsstrategie gegenüber einem kommerziell verfügbaren System Vorteile bietet. Die Effizienz eines kommerziellen Systems von Autarq mit einem System mit Maximum-Power-Point-Trackern untersucht wurde. Die endgültige Systemspezifikation konnte jedoch nicht abgeschlossen werden, da der Industriepartner plante, die Leerlaufspannung der PV-Module anzupassen. Hintergrund war, dass die bislang niedrigen Spannungen zu hohen Strömen und damit zu erhöhtem Materialaufwand für die Verkabelung führen, während eine Spannungsanhebung wiederum mit erhöhten kapazitiven Verlusten des MPPT verbunden ist. Zur Bewertung dieser Wechselwirkungen wurde ein Auslegungstool entwickelt, dessen Oberfläche in Abbildung 171 dargestellt ist.

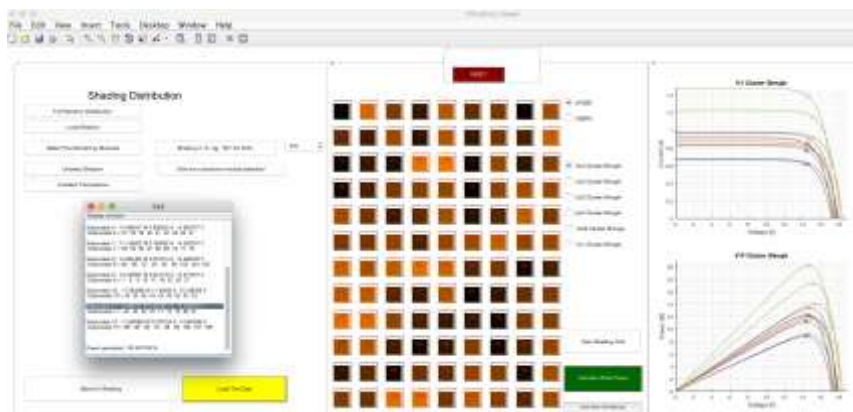


Abbildung 171: GUI Efficiency Viewer

Die Abbildung verdeutlicht, dass Bestrahlungs- und Temperaturverteilungen der Dachsteine unabhängig vorgegeben werden können und außerdem die Clustergröße, also die Anzahl der Dachsteine pro MPPT, variiert werden kann. Auf dieser Grundlage lassen sich die resultierenden V-I- und V-P-Kennlinien simulieren und optimale Verschaltungen in Abhängigkeit von Einstrahlungsprofil und Temperaturverteilung bestimmen. Der entscheidende kritische Testvektor zu diesem Zeitpunkt noch nicht abschließend identifiziert war. Damit dokumentiert Abbildung 171 den Übergang von der konzeptionellen MPPT-Idee zu einem praktisch nutzbaren Bewertungswerkzeug.

Parallel dazu wurde gemeinsam mit Autarq ein erster Hybrid-Dachstein mit integrierten PV-Elementen aufgebaut. Autarq schaltet zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Bestrahlungsstärken und Beschattung infolge der Dachsteinwölbung je Dachstein vier Streifen von Solarzellen parallel; in jedem Streifen sind 20 Solarzellen der Größe 39 mm × 13 mm in Reihe verschaltet. Rechnerisch ergeben sich daraus eine Leerlaufspannung von 12,92 V, ein Kurzschlussstrom von 0,78 A und eine maximale Leistung von 8,1 W bei 1000 W/m² Einstrahlung. Zugleich wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Werte unter Realbedingungen wegen Randverlusten und der praktisch nicht erreichbaren gleichzeitigen homogenen Vollbestrahlung aller Zellen geringer ausfallen.

Ein zentrales technisches Problem des Arbeitspakets ergab sich aus der sehr niedrigen Ausgangsspannung der Hybrid-Dachsteine. Im Punkt maximaler Leistungsabgabe nur etwa 10 V an-

liegen. Dies führt entweder zu hohen Leitungsverlusten oder zu sehr großen Leiterquerschnitten, wenn die erzeugte Energie zum Energiespeicher im Keller geführt werden soll. Die reale bauliche Situation wird in Abbildung 172 dargestellt.

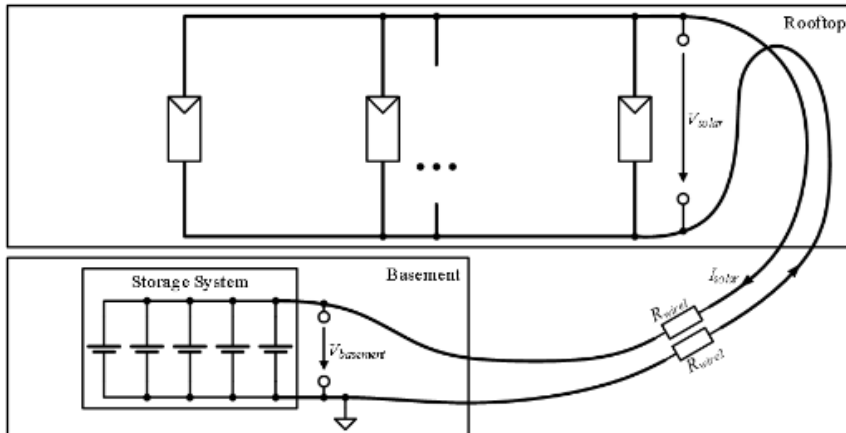


Abbildung 172: Photovoltaisch aktivierte Dachziegel auf dem Dach mit Anbindung an das Energiespeichersystem

Die Abbildung zeigt den Aufbau auf dem Dach sowie die Anbindung an das Speichersystem und macht damit anschaulich, dass die elektrische Frage nicht nur auf Zellebene, sondern im gesamten Pfad zwischen Dach und Keller zu lösen war. Genau an dieser Stelle wird die Relevanz der Leistungselektronik deutlich: Nicht die photovoltaische Aktivierung allein, sondern erst die geeignete elektrische Verschaltung und Spannungsanhebung entscheiden über die tatsächliche Nutzbarkeit der Dachsteine im Gebäudesystem.

Zur Lösung dieses Problems wurde ein leistungselektronischer Konverter-Prototyp entwickelt. Es werden jeweils zwei Hybrid-Dachsteine in Reihe geschaltet und mit einem Konverter verbunden werden. Dieser beobachtet den Arbeitspunkt der Solarzellen, betreibt sie im Punkt maximaler Leistungsabgabe und transformiert die erzeugte Leistung auf eine von außen angelegte Spannung von 80 V hoch. Die Konverter arbeiten damit als Stromquelle mit durchschnittlich konstanter Leistungsabgabe. Der erste Prototyp ist in Abbildung 173 dokumentiert; seine Effizienz in Abhängigkeit von der Solarzellenleistung zeigt Abbildung 174.

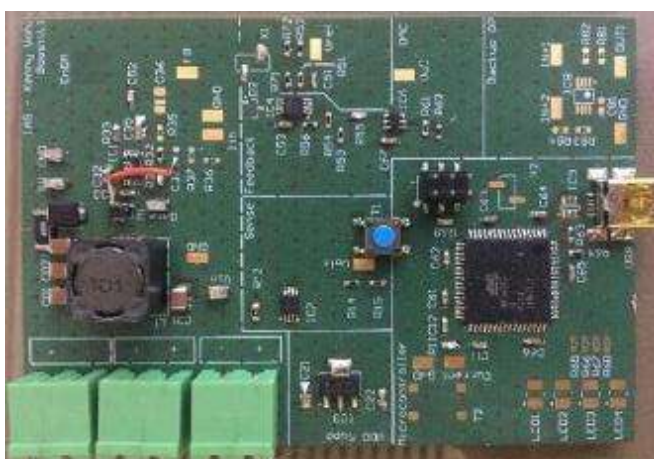


Abbildung 173: Foto des Konverters-Prototyps

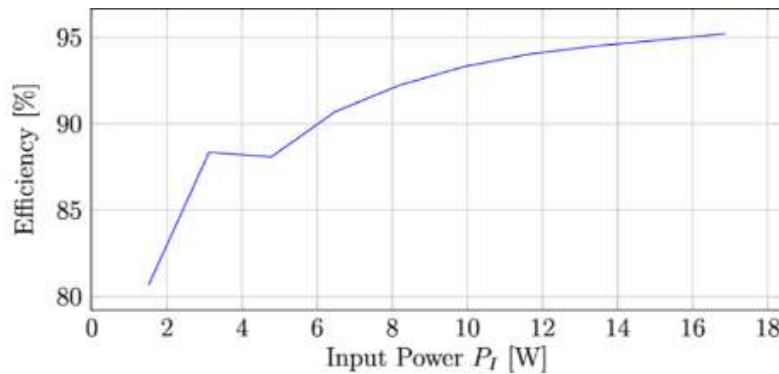


Abbildung 174: Effizienz des Konverter-Prototyps

Für die Bewertung ist hier besonders relevant, dass die Arbeiten nicht bei der theoretischen Konzeption stehenblieben, sondern in einen realen leistungselektronischen Demonstrator überführt wurden. Für den sicheren Betrieb ist ein Überspannungsschutz erforderlich, der auf Basis einer Schaltung mit zwei Zener-Dioden entwickelt und getestet wurde, damit der Konverter auch ohne angeschlossene Last keinen Schaden nimmt.

Die Systemverschaltung mehrerer Dachsteine und Konverter wird in Abbildung 175 schematisch dargestellt. Diese Abbildung ist für das Verständnis des Arbeitspakets zentral, weil sie die eigentliche Systemidee sichtbar macht: Nicht jeder Dachstein wird direkt in das Gebäudesystem eingespeist, sondern jeweils zwei Dachsteine werden mit einem Konverter zu einem Modul zusammengefasst; mehrere solcher Module werden ausgangsseitig parallel geschaltet und über ein gemeinsames Kabel mit dem Energiespeicher verbunden.

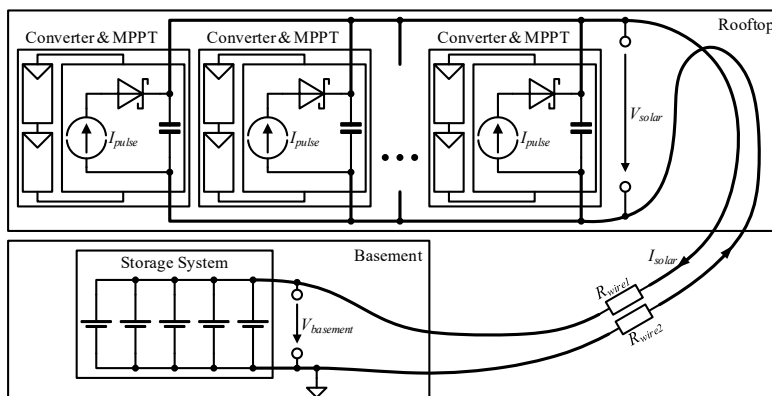


Abbildung 175: Zwei Hybrid-Dachziegel in Serie mit Konverter und Anbindung an das Energiespeichersystem

Bei einer mittleren Leistung von 5 W pro Hybrid-Dachstein, 100 Ziegeln pro Kabel, einem Kabelquerschnitt von 4 mm², einer Kabellänge von 60 m und einer Konvertereffizienz von 93 % steigt die am Energiespeicher nutzbare Leistung von 62,5 % der erzeugten Leistung bei einem 20-V-System ohne Konverter auf 90,7 % bei Nutzung des Konverters und einer Ausgangsspannung von 80 V. Diese Aussage ist fachlich besonders tragfähig, weil sie den Mehrwert der Leistungselektronik nicht abstrakt, sondern unmittelbar in nutzbarer Systemeffizienz ausdrückt

Zur experimentellen Bewertung der PV-Dachsteine wurde ein Demonstrator aufgebaut, der den Vergleich zwischen den neuen gewellten Dachsteinen für das denkmalgeschützte Quartier und bereits existierenden ebenen Dachsteinen erlaubt. Der Aufbau wird in Abbildung 176 gezeigt; die zugehörigen elektronischen Lasten und das Messprogramm sind in Abbildung 177 dargestellt.



Abbildung 176: Demonstrator (links) und Messstation (rechts)



Abbildung 177: Elektronische Lasten und Messprogramm

Die Messstation wurde entwickelt, um Daten zur tatsächlich erzielbaren Energieausbeute und deren Verteilung über die Leistung zu gewinnen. Diese Messungen stellen einen zentralen Baustein des Arbeitspakets dar, da erst sie eine belastbare Auslegung der Leistungselektronik auf Basis realer Betriebszustände ermöglichen. AP 2.4.2 ist damit ausdrücklich nicht nur eine Elektronikentwicklung, sondern zugleich eine empirische Untersuchung des realen photovoltaischen Verhaltens der Dachsteine.

Die Ergebnisse dieser Langzeitmessungen werden in Abbildung 178 zusammengefasst. Dort ist die täglich erzielbare Energie für den ebenen Dachstein über den Zeitraum vom 01. August 2017 bis 29. Mai 2019 dargestellt. Das sich das für Photovoltaik typische stark fluktuierende Energieangebot zeigt sich deutlich, im betrachteten Zeitraum wurde ein mittlerer täglicher Energieertrag von 300 Wh/m^2 erzielt.

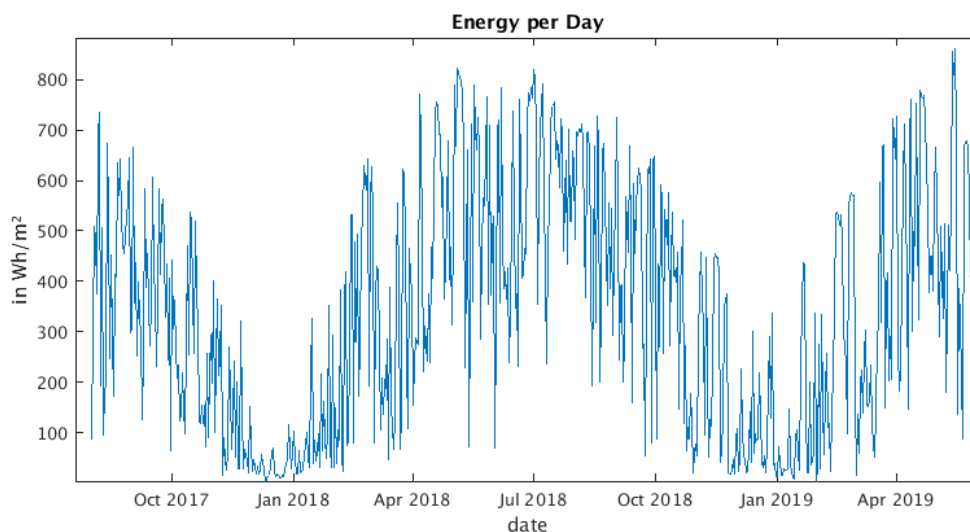


Abbildung 178: Täglich verfügbare Energie pro m^2

Auf Grundlage dieser Daten konnte anschließend untersucht werden, in welchem Leistungsbe-
reich die meiste Energie tatsächlich bereitgestellt wird. Die dafür verwendete statistische Darstel-
lung ist in Abbildung 179 wiedergegeben. Aus dem Histogramm wird gefolgert, dass das Effi-
zienzmaximum des Wandlers sinnvollerweise nicht bei maximaler Leistung, sondern bei mittleren
Leistungen liegen sollte und dass zugleich auch im Bereich niedriger Leistungen bis etwa 10
 W/m^2 eine hohe Effizienz erforderlich ist. Gerade diese Erkenntnis ist für die leistungselektroni-
sche Auslegung zentral, weil sie eine direkte Verbindung zwischen realem Einstrahlungsverlauf
und Konverterdesign herstellt.

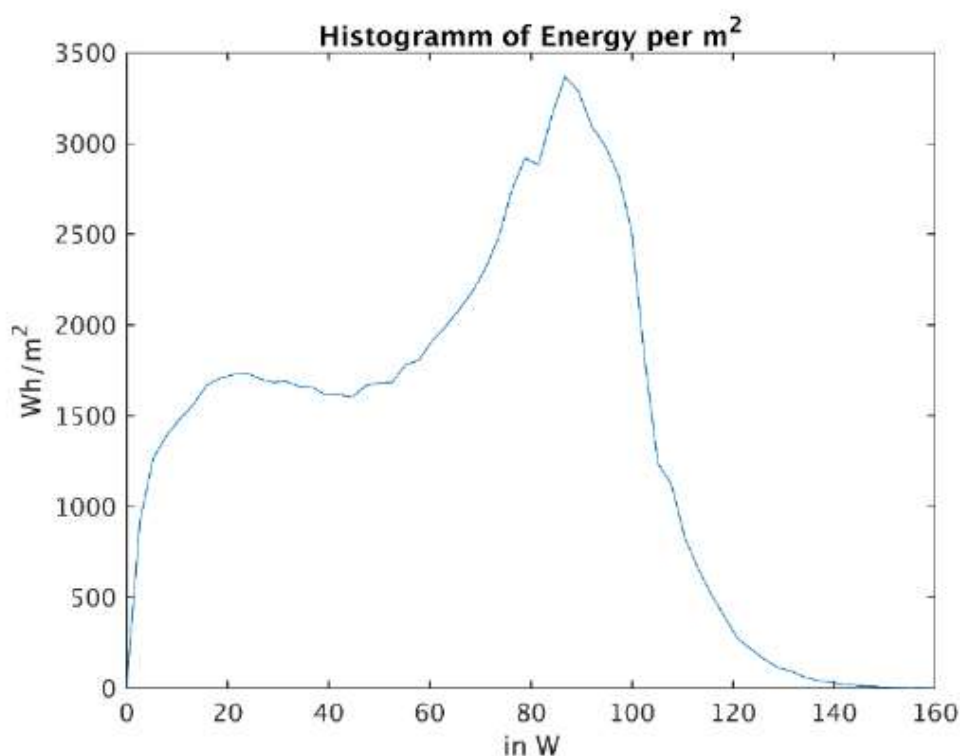


Abbildung 179: Histogramm der verfügbaren Energie pro m^2 über der Leistung

Ein weiterer wesentlicher Ergebniskomplex betrifft den direkten Vergleich zwischen gewellten und vollflächigen glatten Dachsteinen. Abbildung 180 und Abbildung 181 zeigen, dass der ebene Dachstein im Mittel etwa 1,3-mal so viel Energie liefert wie der gewellte Dachstein; der Wertebereich liegt etwa zwischen 1,1 und 1,4. Dies ist zum Teil auf den größeren Anteil aktiver Fläche zurückzuführen: Dieser beträgt 69,3 % beim glatten gegenüber 59,8 % beim gewellten Ziegel, woraus bereits ein erwartbarer Ertragsvorteil von 15,9 % resultiert. Der verbleibende Unterschied wird mit Eigenverschattung, Randeffekten und ungünstigeren Ausrichtungswinkeln einzelner Zellen erklärt. Zugleich wird beschrieben, dass der Unterschied im Sommer tendenziell kleiner ausfällt, weil die Eigenverschattung infolge des steileren Sonnenverlaufs zeitlich kürzer wirkt. Für die Schlussdarstellung ist diese Differenzierung wichtig, weil sie zeigt, dass der geringere Ertrag des gewellten Dachsteins nicht als grundlegendes Scheitern der Technologie zu interpretieren ist, sondern aus der denkmalverträglichen Geometrie und ihren optischen sowie konstruktiven Randbedingungen resultiert.

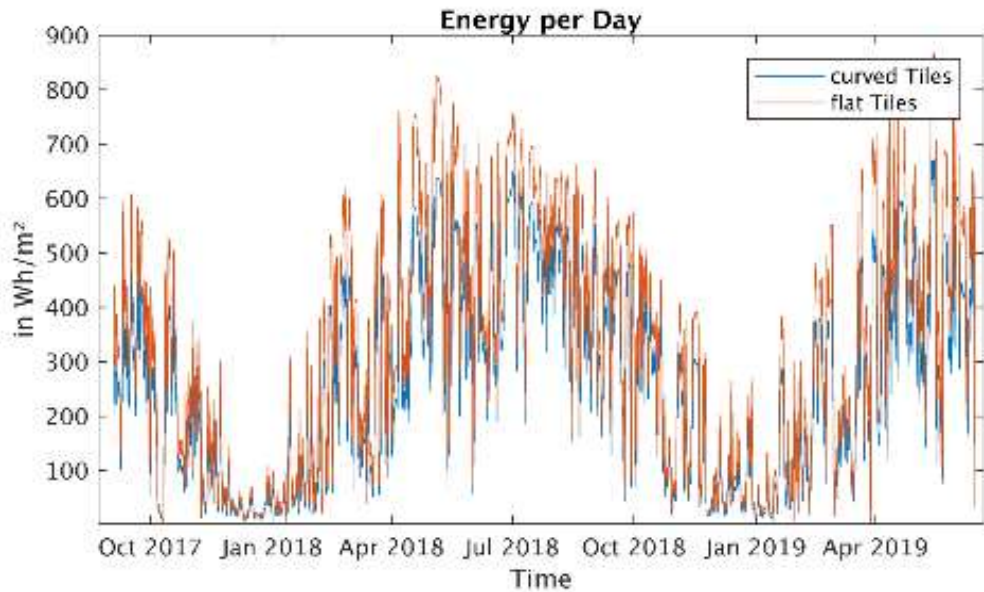


Abbildung 180: Energie pro Tag der gewellten Ziegel sowie der vollflächigen Dachsteine

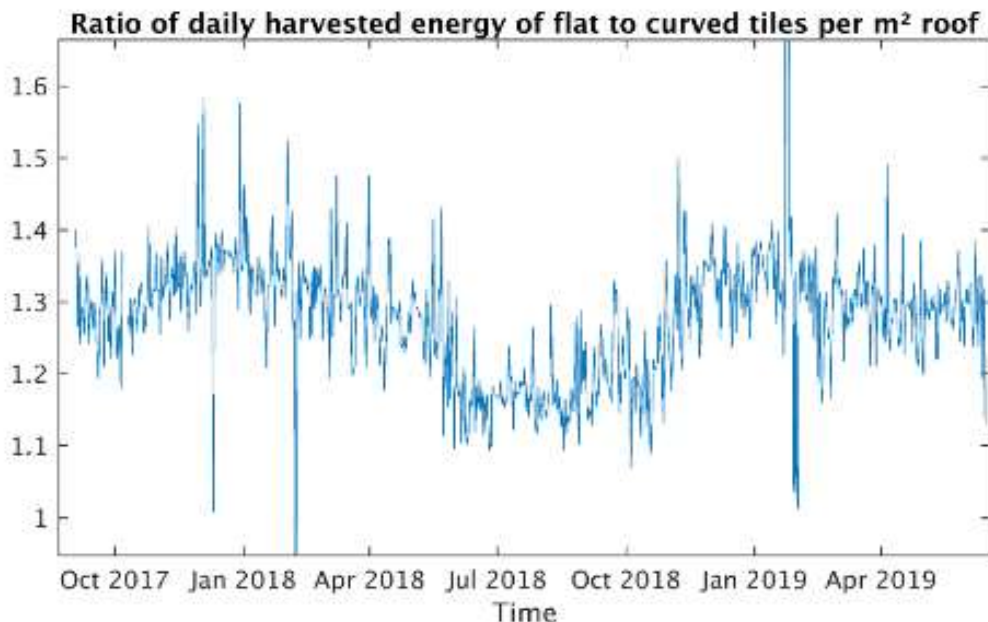


Abbildung 181: Energie-Verhältnis zwischen gewelltem und vollflächigem Ziegel

Die weitere Analyse der Messdaten macht zudem deutlich, dass einzelne Auffälligkeiten nicht allein geometrisch, sondern auch fertigungstechnisch bedingt waren. Ein defekter elektrischer Kontakt an einem Ziegel, dessen teilweise gelöster Anschluss in Abbildung 182 dargestellt ist, konnte festgestellt werden. Die Auswirkungen dieses Defekts auf den Leistungsverlauf werden in Abbildung 183 analysiert. An einem kalten, aber sonnigen Wintertag wird dort sichtbar, dass mit zunehmender Ziegeltemperatur die Leistung sprunghaft abfällt und später mit sinkender Temperatur wieder ansteigt. Dies kann als temperaturabhängigen Kontaktfehler interpretiert werden, der vor allem bei stärkeren Temperaturschwankungen auftritt. Dass der defekte Ziegel am 24.02.2019 ausgetauscht wurde und danach kein weiterer Defekt auftrat, ist für die Schlussbewertung ebenfalls relevant: Die beobachteten Mindererträge der gewellten Dachsteine sind daher nicht ausschließlich der Geometrie zuzuschreiben, sondern wurden in Teilen durch einen proto-

typischen Kontaktierungsfehler überlagert. Diese Einordnung stärkt die Aussagekraft der übrigen Messungen, weil sie einen konkreten, identifizierten Störfaktor transparent macht.



Abbildung 182: Vollflächiger Ziegel mit defektem elektrischem Kontakt

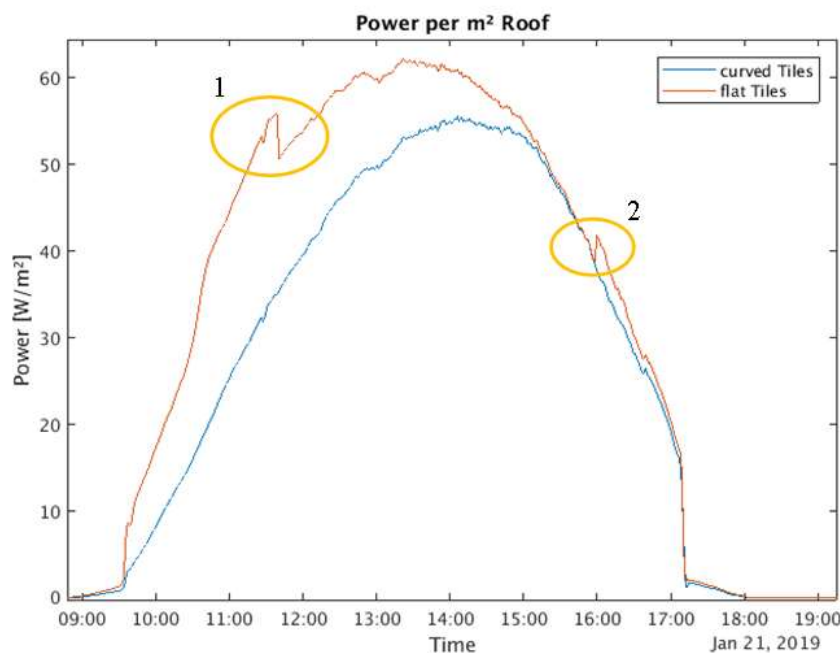


Abbildung 183: Leistungskurve mit defektem Ziegel

Über die Messungen hinaus wurde im Arbeitspaket auch die Miniaturisierung und ASIC-Fähigkeit der Leistungselektronik weiterverfolgt. Der hierzu kann auf die Untersuchung geeigneter Hochvolt-Technologien im Rahmen von Europractice, insbesondere des ONC18-I4T-Prozesses von ON Semiconductor sowie einer alternativen TSMC-Technologie verwiesen werden. Die dafür relevanten Zwischenergebnisse sind in Abbildung 184 und Abbildung 185 dargestellt. Sie zeigen, dass die analoge Performance der Technologie grundsätzlich geeignet erscheint, die Fläche der Treiberschaltungen jedoch einen signifikanten Teil der Chipfläche einnehmen kann. Daraus ergibt sich die projektrelevante Erkenntnis, dass die Integration in einen ASIC technisch grundsätzlich möglich erscheint, die Technologieauswahl jedoch unmittelbare Auswirkungen auf Integrationsgrad, Kosten und Erweiterbarkeit – insbesondere im Hinblick auf zusätzliche Kommunikationsfunktionen – besitzt.

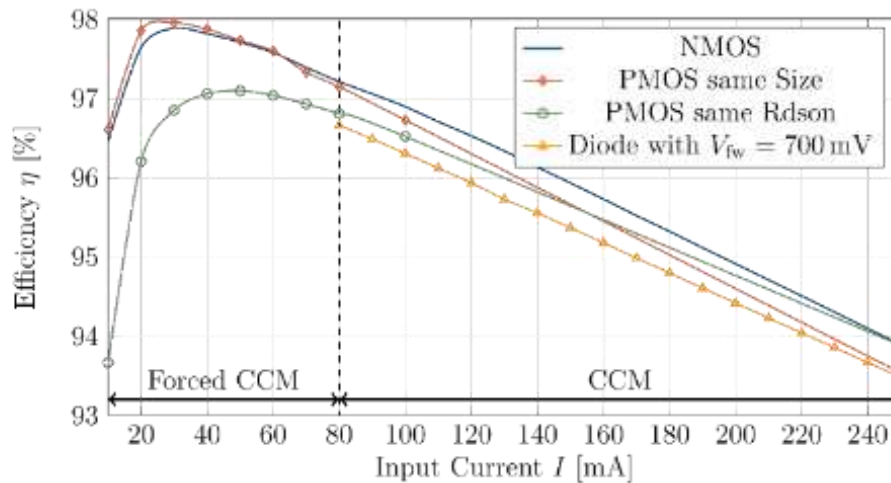


Abbildung 184: Begrenzung der Effizienz durch die Schalttransistoren

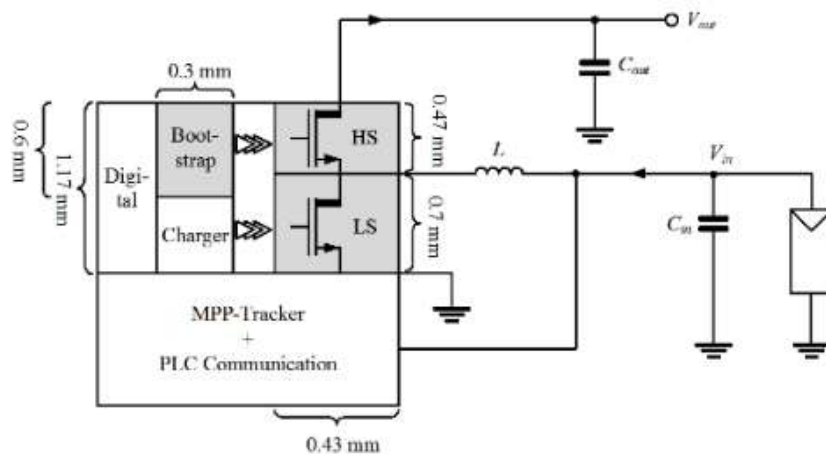


Abbildung 185: Flächenabschätzung Hochsetzsteller, MPPT

Besonders anschaulich wird die systemische Relevanz der Leistungselektronik bei der Betrachtung der Verkabelung des Dachsystems. Abbildung 186 beschreibt ein Feld aus 100 Dachsteinen in einer Anordnung von 20×5 Ziegeln. Ohne Spannungsanhebung ergeben sich bei einem angenommenen Zellstrom von 810 mA sehr hohe Ströme in den Stich- und Strangkabeln; es zeigt sich, dass sich bei nur 1 % toleriertem Effizienzverlust rechnerisch ein Kabelquerschnitt von 815 mm² ergäbe, was praktisch nicht einsetzbar ist. Selbst bei 10 % Verlust bliebe mit 81,5 mm² ein sehr großer Querschnitt erforderlich.

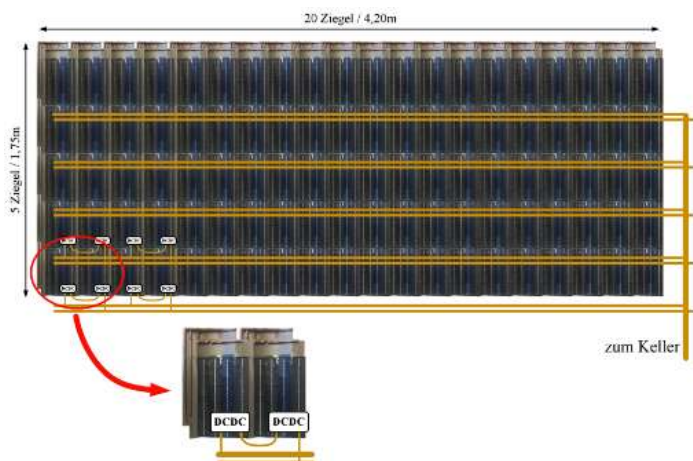


Abbildung 186: Anordnung und Verbindung von 100 PV-Dachsteinen mit Schaltwandlern

Um diese Randbedingung zu entschärfen, wird in Abbildung 187 die Serienschaltung zweier Schaltwandlermodule zu einem 80-V-System gezeigt. Daraus folgt, dass sich die minimale erforderliche Querschnittsfläche bei gleichem Leistungsverlust auf etwa 13 mm² reduziert, also um den Faktor 64. Es wird deutlich, dass die Leistungselektronik nicht nur den Wirkungsgrad verbessert, sondern überhaupt erst eine technisch und wirtschaftlich praktikable Verkabelung eines größeren Dachsteinarrays ermöglicht.

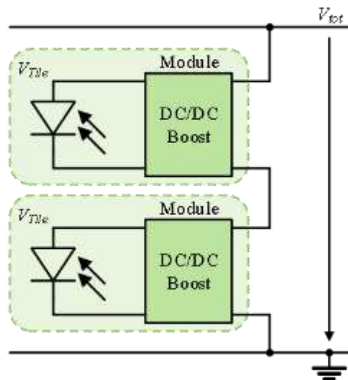


Abbildung 187: 80 V System: Serienschaltung von zwei Schaltwandlern

Die daraus abgeleitete Prinzipschaltung wird in Abbildung 188 dargestellt. Neben dem ASIC wird eine besondere Leistungsinduktivität sowie Ein- und Ausgangskapazitäten als externe Komponenten benötigt. Die Effizienz des Gesamtsystems unter Einbeziehung der Kabelverluste ist in Abbildung 189 zusammengefasst. Für einen angenommenen Eingangsbereich zeigt sich eine Gesamteffizienz von über 94 % bei maximalem Zellstrom, womit das System die Variante ohne Elektronik und mit großem Kabelquerschnitt um etwa 4 Prozentpunkte übertrifft.

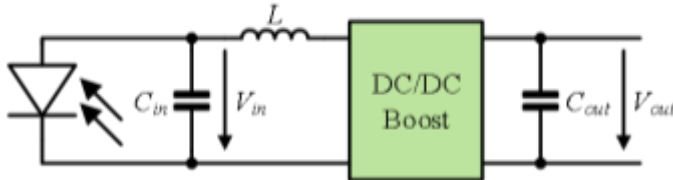


Abbildung 188: Prinzipschaltung Solardachsteine und DC-DC Konverter mit externen Bauteilen

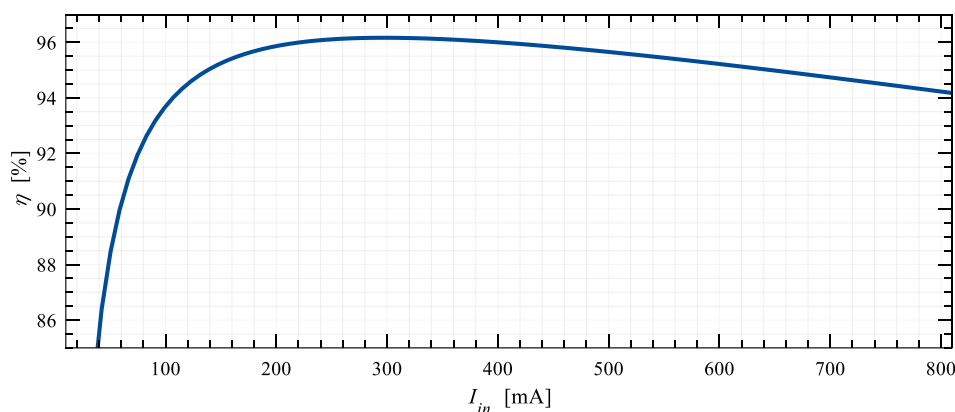


Abbildung 189: Effizienz des Schaltwandlers inklusive Kabelverluste

Schließlich wird in Abbildung 190 das transiente Verhalten zweier seriell verschalteter Konverter behandelt. Ab einer Mindest-Ausgangskapazität arbeiten beide Konverter im eingeschwungenen Zustand unabhängig voneinander und liefern denselben Ausgangsstrom, auch wenn ihre Ausgangsspannungen leicht voneinander abweichen können. Damit wird die prinzipielle Stabilität der Serienschaltung für das 80-V-System gestützt.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 2.4.2 damit als das zentrale elektronische Integrationsarbeitspaket innerhalb der Dachsteinentwicklung einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt, dass die photovoltaische Aktivierung denkmalverträglicher Dachsteine allein noch keine ausreichende Systemlösung darstellt, weil die niedrigen Spannungen ohne zusätzliche Leistungselektronik zu unpraktikablen Strömen, hohen Verkabelungsverlusten und großen Leiterquerschnitten führen würden. Erst durch die Entwicklung eines angepassten DC-DC-Konverters mit MPPT, die in Abbildung 171, Abbildung 173, Abbildung 175, Abbildung 186 und Abbildung 187 konkretisiert wird, konnte eine technisch belastbare Lösung für die Systemintegration entwickelt werden. Gleichzeitig liefern die Messungen aus Abbildung 178 bis Abbildung 183 eine wertvolle empirische Grundlage für die Auslegung der Elektronik unter realen Einstrahlungs-, Verschattungs- und Fehlerbedingungen.

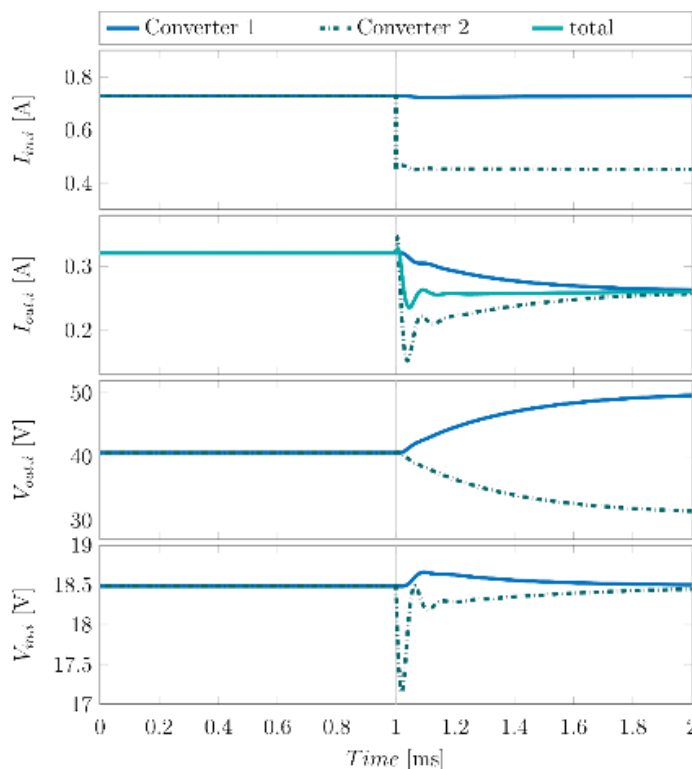


Abbildung 190: Einschwingverhalten zweier in Serie verschalteter Boost Konverter

AP 2.4.3 baut unmittelbar auf den Ergebnissen von AP 2.4.2 auf. Nachdem dort die photovoltaische Aktivierung der Dachsteine sowie die zugehörige Leistungselektronik zur Effizienzsteigerung entwickelt wurden, richtete sich der Fokus nun auf eine Funktionalitätserweiterung der PV-Dachsteine. Ziel war es, zusätzlich zur reinen Energieumwandlung auch solche Informationen erfassbar und kommunizierbar zu machen, die für Funktionsprüfung, Monitoring und Betriebssicherheit der intelligenten Dachsteine relevant sind. Der Forschungsantrag benennt hierfür ausdrücklich den Entwurf von Schaltungskonzepten zur Messung wichtiger Kenngrößen der PV-Dachziegel, die Planung einer geeigneten lokalen Schnittstelle zur manuellen Funktionsprüfung sowie die Prüfung einer erweiterten Kommunikationsschnittstelle zur verbesserten automatisierten Funktionsprüfung einzelner Ziegel. AP 2.4.3 übernimmt damit innerhalb des Gesamtkomplexes der aktivierten Dachsteine die Aufgabe, die rein energetische Funktion um eine informations- und kommunikationstechnische Ebene zu ergänzen.

Dieses Arbeitspaket kann nicht losgelöst von AP 2.4.2 betrachtet werden. Einerseits ergeben sich aus der vorgesehenen Erfassung von Kenngrößen wie Kontaktwiderstand, Temperatur oder aufgenommener Leistung zusätzliche Anforderungen an den Schaltungsentwurf des in AP 2.4.2 ent-

wickelten Leistungskonverters; andererseits beeinflusst die dort gewählte Konvertertopologie die in AP 2.4.3 möglichen Mess- und Kommunikationskonzepte. Für die Bewertung ist diese Wechselwirkung wichtig, weil sie zeigt, dass die Funktionalitätserweiterung keine nachträgliche Zusatzfunktion darstellt, sondern systemisch in die Dachstein-Elektronik eingebettet werden musste.

Im Projektverlauf wurde jedoch zugleich deutlich, dass eine vollständige Integration dieser erweiterten Kommunikations- und Prüffunktionen direkt in den P-DC-Konverter nicht ohne Zielkonflikte möglich ist. Für eine mögliche Kleinserie auf der Margarethenhöhe oder eine spätere Serienfertigung sollte die Schaltung zur Effizienzoptimierung mit möglichst geringem Bauraum und geringen Kosten realisiert werden. Die zusätzlich betrachteten Konzepte zur Power Line Communication hätten diesen Aufwand jedoch erhöht. Zwar wurde ein Konzept betrachtet, das eine Realisierung ohne zusätzlichen Bauteileaufwand in einer künftig monolithisch integrierten Schaltung möglicherweise erlauben könnte, in einer diskreten Schaltung war dies jedoch nicht mit vergleichbarem Aufwand umsetzbar. Eine Kommunikationsschnittstelle für die eigentliche Kleinserie der Effizienzoptimierungsschaltung ist nicht zwingend erforderlich und sollte aus wirtschaftlichen Gründen nicht fest in den P-DC-Konverter integriert werden. Diese Entscheidung ist für die Bewertung des Arbeitspakets zentral, weil sie den Unterschied zwischen technisch Machbarem und wirtschaftlich Sinnvollem im Entwicklungspfad klar offenlegt.

Hinzu kommt ein weiterer methodischer Gesichtspunkt: Es ist sinnvoll, die im Projekt bereits gemessenen Daten zur Sonneneinstrahlung und Energiegewinnung der gewellten Solardachziegel ohne P-DC-Konverter später mit Daten mit P-DC-Konverter zu vergleichen. Eine integrierte Power-Line-Communication-Einheit würde diesen Vergleich verfälschen, weil sie selbst einen zusätzlichen Einfluss auf die Effizienz hätte. Damit wird die Entscheidung für eine entkoppelte, modulare Lösung nicht nur ökonomisch, sondern auch experimentell begründet. Die Funktionalitätserweiterung wird also bewusst vom eigentlichen Effizienzpfad getrennt, um die messtechnische Aussagekraft der Untersuchungen zu erhalten.

Vor diesem Hintergrund wurde ein modulares Konzept entwickelt. Der P-DC-Konverter und die Funktionalitätserweiterung wurden so aufeinander abgestimmt und entworfen, dass die zusätzliche Elektronik als selbstständiges Modul auf den P-DC-Konverter aufgesteckt werden kann. Der P-DC-Konverter bleibt dabei voll funktionsfähig – sowohl mit als auch ohne Funktionalitätserweiterung. Diese Architektur ist ein wesentliches Ergebnis des Arbeitspakets, weil sie die Effizienzoptimierung als Basissystem erhält und gleichzeitig eine erweiterte Diagnostik- und Kommunikationsfunktion für Forschungszwecke ermöglicht. Die reale Einbindung der photovoltaisch aktivierten Dachziegel in das Energiespeichersystem wird in Abbildung 191 dargestellt. Die Dachziegel sind nicht als isolierte Prüfkörper, sondern als Komponenten eines realen Dach-Keller-Systems zu verstehen.

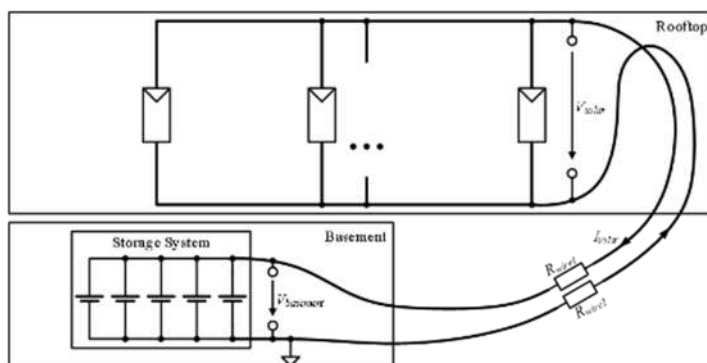


Abbildung 191: Photovoltaisch aktivierte Dachziegel auf dem Dach mit Anbindung an das Energiespeichersystem

Über die definierte Schnittstelle zwischen P-DC-Konverter und Funktionalitätserweiterung können Strom-, Spannungs- und Leistungsdaten der Solarzelle kommuniziert werden. Ergänzend kann mit Hilfe eines integrierten Sensors auch die Temperatur erfasst und übertragen werden. Die ursprünglich ebenfalls vorgesehene direkte Messung des Kontaktwiderstands wurde dagegen als nicht angemessen im Verhältnis zum Aufwand bewertet, da sich der Leistungsverlust auch aus der Differenz zwischen den Messungen an den einzelnen Hybrid-Dachziegeln und der Leistungsmessung am Energiespeichersystem ableiten lässt.

Die gewählte Kommunikationsform basiert auf Power Line Communication. Die Schaltung wurde zur Funktionalitätserweiterung entworfen und ihr Zeitverhalten sowie die Modulation in einem Schaltungssimulator untersucht. Die Simulationen zeigen, dass eine Datenübertragung vom Modell der Hybrid-Dachsteine zur Basisstation im Keller trotz Störeinträge durch die schaltenden P-DC-Konverter möglich ist. Dabei verhalten sich die Konverter wie Stromquellen, die den Strom aus den Hybrid-Dachziegeln pulswise in Richtung des Energiespeichersystems schieben, während das Energiespeichersystem als Last wirkt und die Spannung regelt. Die auf dem Dach beziehungsweise im Keller festgelegten Größen werden genutzt, um die Modulation für die Kommunikation einzuprägen. Dieser Mechanismus wird weiter konkretisiert: Auf dem Dach wird der Strom in Richtung des Energiespeichersystems gezielt variiert, um Daten zu übermitteln; vom Energiespeichersystem zum Dach wird der Widerstand im Pfad leicht erhöht, wodurch die Spannung an den Dachziegeln geringfügig steigt und ebenfalls dekodiert werden kann. Damit belegt AP 2.4.3, dass eine bidirektionale Kommunikation über die ohnehin vorhandene elektrische Verbindung prinzipiell möglich ist.

Die praktische Umsetzung dieser Kommunikationslösung wurde bis zum Layoutstadium geführt. Für die Funktionalitätserweiterung wurde zum einen ein Aufsteckmodul für den P-DC-Konverter auf dem Dach, zum anderen eine in Reihe mit dem Energiespeichersystem geschaltete Schaltung im Keller entwickelt. Beide Schaltungen wurden gelayoutet und in Produktion gegeben. Das Layout wird in Abbildung 192 dargestellt. Abbildung 192 zeigt die gewählte Modularität sichtbar macht: links die Schaltung am Energiespeichersystem, rechts das kompakte Aufsteckmodul für den Dachbereich 850 mm × 75 mm für die Reihenschaltung am Energiespeichersystem und 39 mm × 50 mm für das Aufsteckmodul auf dem Dach). Damit wird deutlich, dass die Funktionserweiterung zwar technisch realisiert wurde, räumlich jedoch spürbar über die Minimalanforderungen einer reinen Effizienzschaltung hinausgeht.

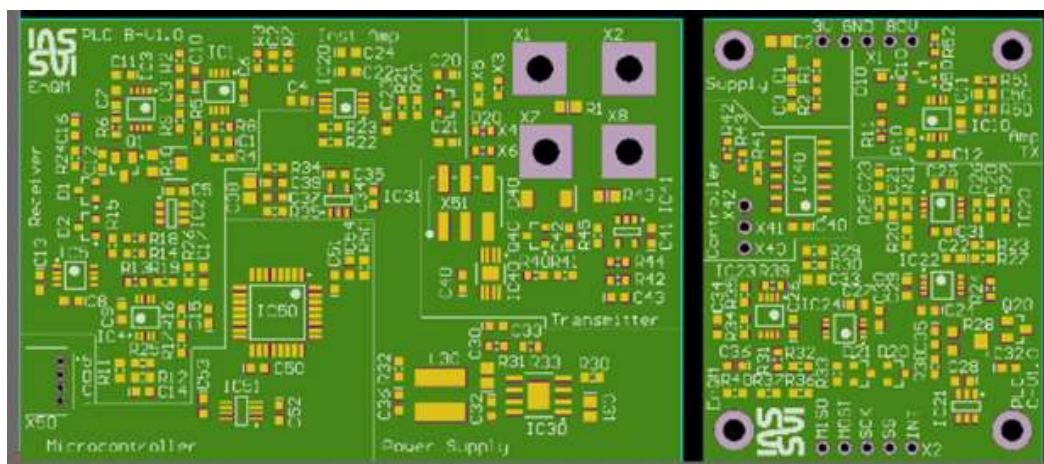


Abbildung 192: Layout des PCB am Energiespeichersystem (links) und des Clients als Aufsteckmodul für den P-DC-Konverter (rechts)

Der Umsetzungsstand wird schließlich in Abbildung 193 dokumentiert. Abbildung 193 hat für AP 2.4.3 vor allem die Funktion eines Entwicklungsnachweises: Sie zeigt, dass die Kommunikations-

lösung nicht bei Simulation und Layout stehenblieb, sondern in einen realen Hardwareaufbau überführt wurde. Gleichzeitig werden die Grenzen dieses Ansatzes formuliert: Das dargestellte System ist für den Einsatz von Photovoltaikelementen kleiner Leistung deutlich zu umfangreich. Diese Einschätzung ist für die fachliche Bewertung wesentlich, weil sie den Forschungscharakter der Lösung offenlegt und klar zwischen einem funktionsfähigen Versuchsaufbau und einer wirtschaftlich tragfähigen Kleinserienlösung unterscheidet.

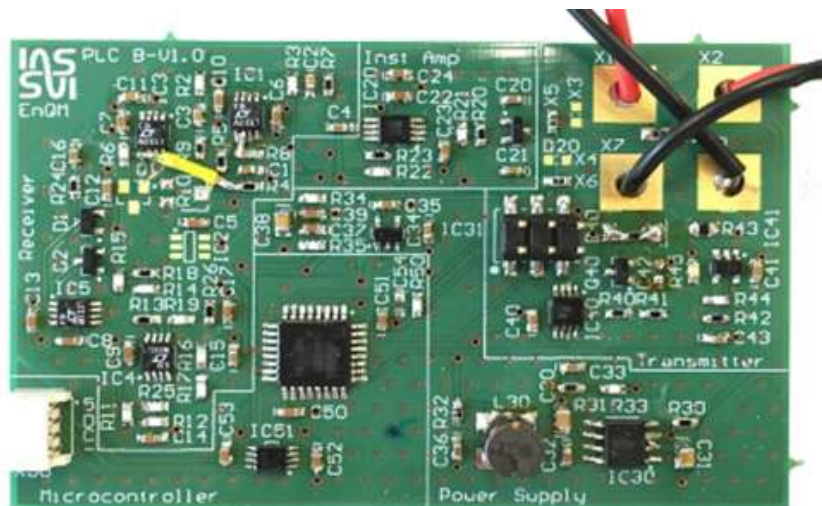


Abbildung 193: Aufbau des Power Line Communication Moduls am Energiespeichersystem

In der fachlichen Bewertung ist AP 2.4.3 somit als kommunikations- und schnittstellenorientiertes Ergänzungsarbeitspaket innerhalb der Entwicklung intelligenter PV-Dachsteine einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt, dass eine Funktionalitätserweiterung zur Erfassung und Kommunikation von Strom-, Spannungs-, Leistungs- und Temperaturdaten grundsätzlich möglich ist und dass eine bidirektionale Power-Line-Communication zwischen Dach und Energiespeichersystem auch unter den Störeinflüssen schaltender Konverter prinzipiell realisiert werden kann. Zugleich wird aber deutlich, dass eine unmittelbare Integration dieser Funktionen in die Effizienzschaltung des P-DC-Konverters für eine wirtschaftliche Kleinserie nicht zweckmäßig erscheint. Die gewählte modulare Trennung zwischen Effizienzkonverter und Kommunikationsaufsatz ist daher als wesentliche Erkenntnis des Arbeitspakets zu bewerten. Mit Abbildung 191, Abbildung 192 und Abbildung 193 liegt für AP 2.4.3 eine schlüssige Dokumentation vom Systemkontext über den Schaltungs-entwurf bis zur realen Hardwareumsetzung vor.

AP 2.4.4 baut unmittelbar auf den Ergebnissen aus AP 2.4.2 und AP 2.4.3 auf. Nachdem in den vorangegangenen Teilaufgaben die photovoltaische Aktivierung der Dachsteine, die leistungselektronische Spannungsanhebung sowie die optionale Funktionalitätserweiterung zur Kommunikation entwickelt worden waren, bestand die Aufgabe nun darin, das Schaltungskonzept in einen robusten Demonstrator zu überführen. Zielsetzung des Arbeitspakets war damit die praktische Umsetzung der zuvor entwickelten Leistungselektronik in ein demonstratorfähiges System, einschließlich Schaltungsentwurf, Platinenlayout, Bestückung und experimenteller Bewertung der Leistungsfähigkeit. Bereits aus dieser Zielstellung wird deutlich, dass AP 2.4.4 nicht mehr primär konzeptionell, sondern umsetzungs- und validierungsorientiert angelegt ist.

Aufgrund der Ergebnisse aus AP 2.4.2 und AP 2.4.3 sowie der noch ausstehenden abschließenden wirtschaftlichen Bewertung der Funktionalitätserweiterung wurde für die Demonstratorentwicklung ausdrücklich ein modulares Konzept gewählt. Es ist festzuhalten, dass zur Erprobung des in AP 2.4.3 entwickelten Kommunikationsbausteins eine Schnittstelle zwischen Leistungselektronik und Kommunikationsmodul vorgesehen wurde, diese jedoch optional bleibt. Ohne

Kommunikationsmodul übernimmt die Leistungselektronik ausschließlich das Hochsetzen der Spannung von etwa 20 V auf etwa 80 V, ohne zusätzliche Datenkommunikation. Diese Entscheidung ist für die Schlussdarstellung wesentlich, weil sie die Demonstratorentwicklung bewusst auf den technisch und wirtschaftlich tragfähigen Kern konzentriert und zugleich die Offenheit für weitergehende Kommunikationsfunktionen erhält.

Der im Arbeitspaket entwickelte Demonstrator basiert auf einem Leistungs-zu-Strom-Konverter, der für eine Eingangsspannung von 15 V bis 25 V und eine Ausgangsspannung von etwa 80 V ausgelegt wurde. Er ist damit für die elektrische Leistung von zwei Dachziegeln mit einer Nennspannung von 20 V konzipiert. Die schematische Struktur ist in Abbildung 194 dargestellt. Zunächst werden Eingangsspannung und Eingangsstrom erfasst; nach einer Eingangskapazität von $C_{IN} = 9,6 \mu\text{F}$ zur Glättung folgen die Einheit zum Maximum Power Point Tracking, die Kontrolleinheit sowie der eigentliche Konverter mit dem Controller TPS40211, dem Schalter M1, der Spule $L = 470 \mu\text{H}$, der Diode D1 und der Ausgangskapazität $C_{OUT} = 10 \mu\text{F}$. Ausgangsseitig wurde zusätzlich ein Überspannungsschutz vorgesehen, damit der Konverter auch ohne angeschlossene Last keinen Schaden nimmt. Für die textliche Einbindung sollte deutlich hervorgehoben werden, dass Abbildung 194 die vollständige innere Struktur des Demonstrators zeigt und damit den Übergang von der Konzeptphase zur realen Hardwarearchitektur markiert.

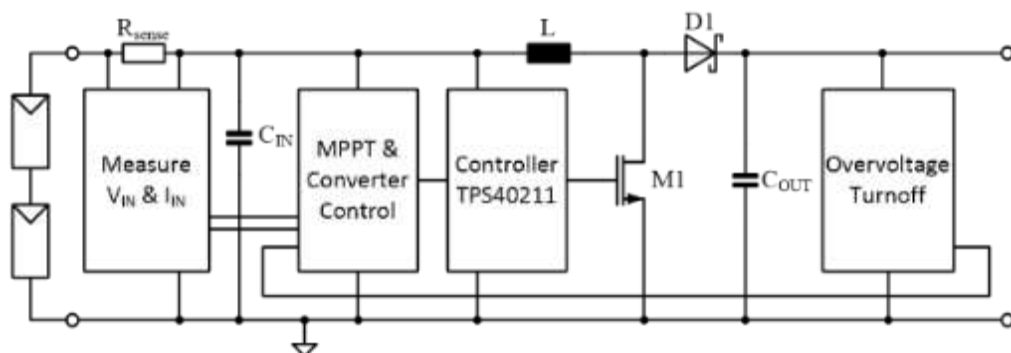


Abbildung 194: Schematische Abbildung des Leistungs-zu-Strom-Konverters.

Die Regel- und MPP-Logik des Converters wurde ebenfalls explizit entwickelt. Die Spannung an R_{SENSE} wird über ein IC stromproportional erfasst und zusammen mit der geteilten Eingangsspannung in einem Mikrocontroller analog-digital gewandelt. Aus Strom und Spannung wird digital die Leistung berechnet; daraus erzeugt der Mikrocontroller die Führungsgröße für die nachfolgende Regelung. Die MPP-Suche erfolgt iterativ: Zunächst wird der Strom auf 0 A gesetzt und die Eingangsspannung gemessen. Anschließend wird der Strom schrittweise erhöht, die Spannung sinkt, und das Produkt aus Strom und Spannung wird fortlaufend bewertet. Sobald das Produkt kleiner wird als im vorherigen Schritt, kehrt der Algorithmus um und halbiert sowie invertiert die Schrittweite. Auf diese Weise nähert sich das System dem Maximum Power Point an.

Die konstruktive Umsetzung des Demonstrators wurde bis zum realen Platinenentwurf geführt. Das Layout ist in Abbildung 195 dokumentiert (Platinenabmessung von 44 mm × 44 mm). Die tatsächlich gefertigte Hardware wird in Abbildung 196 sowie in Abbildung 197 gezeigt. Für die Schlussfassung ist diese Abbildungsgruppe besonders wertvoll, weil damit nicht nur das Schaltungskonzept, sondern auch dessen bauliche Realisierung nachvollziehbar wird.



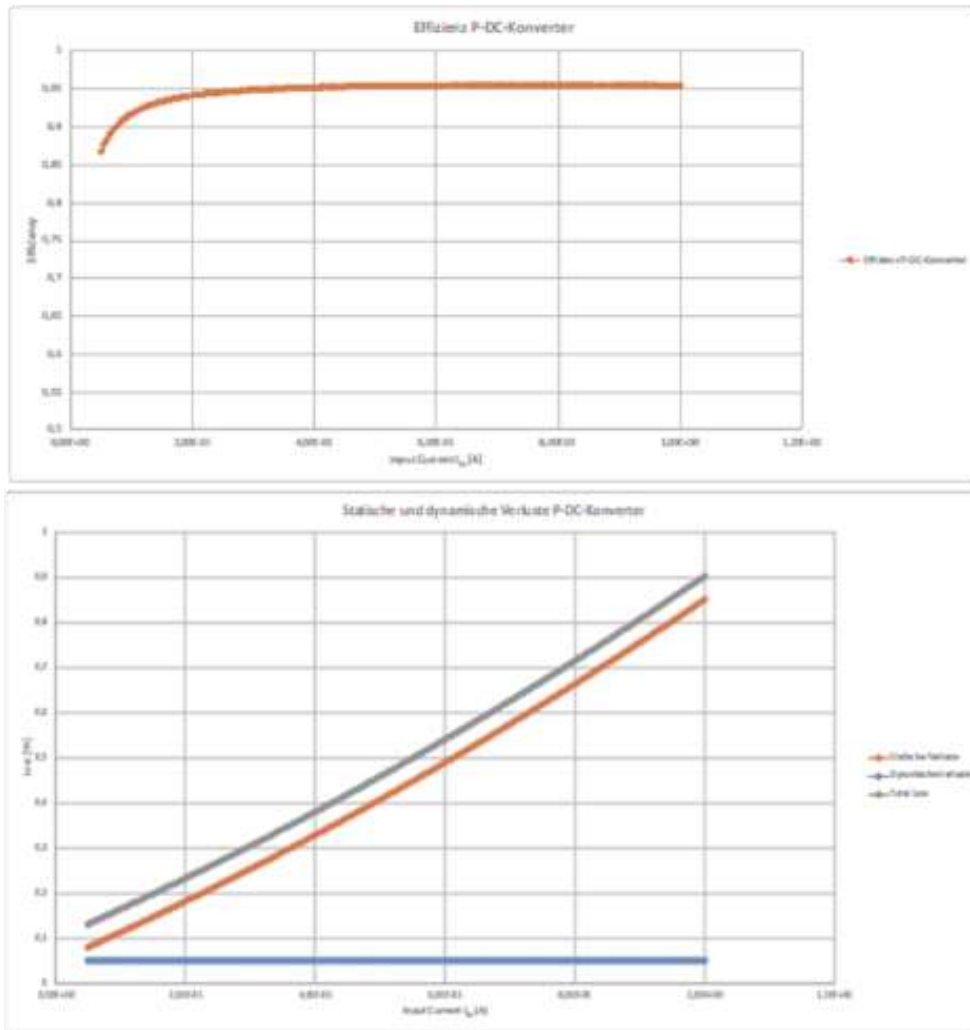


Abbildung 198: Effizienz und Verlustleistung des Leistungs-Strom-Konverters

Aufgrund der fast konstanten Kennlinie der eingestrahlichten Leistung über den Leistungsbereich insbesondere in den unteren Leistungsbereichen wurde eine möglichst hohe Effizienz angestrebt. Entsprechend wurde versucht, die kapazitiven Verluste, die unabhängig von der Eingangsleistung auftreten, möglichst gering zu halten, während die resistiven Verluste mit zunehmender Leistung ansteigen und bei hohen Leistungen dominieren. Das Ergebnis dieser Optimierung ist eine in einem weiten Arbeitsbereich annähernd konstante Effizienz von etwa 95 %; die durchschnittliche Effizienz beträgt 94,7 %, der Spitzenwert 95,6 %. Die maximale Verlustleistung liegt bei etwa 0,9 W bei einem Eingangsstrom von 1 A.

Nach Fertigung und Bestückung wurde die Leistungsfähigkeit des Designs experimentell an zehn bestückten Konvertern untersucht. Zusätzlich wurden drei Konverter in den Dauermessstand aufgenommen und an Solardachziegel angeschlossen, um das Langzeitverhalten zu bewerten. Alle Konverter wurden bei Raumtemperatur (25 °C), ohne Gehäuse und in einem Bereich von 0,02 W bis 21,52 W Maximum-Power-Point-Eingangsleistung getestet. Die Zahl der Arbeitspunkte, Messungen pro Arbeitspunkt und die Messdauer pro Arbeitspunkt wurden zum Teil erhöht; die minimale Anzahl der Arbeitspunkte betrug 14, die Mindestmessdauer 60 s, und in fast allen Messungen wurde alle 5 s die Effizienz erfasst. Die Zusammenfassung dieser Messreihen ist in Tabelle 40 enthalten.

Tabelle 40: Aufführung der durchgeführten Messungen bei Raumtemperatur (25°C) und ohne Gehäuse

Device	#AP	#Mess/AP	#Zeit/AP [s]	Eff _{Peak} [%]	Eff _{Av} [%]	OV [V]	I _{Turn-On} [A]
1T	14	10	60	94,94	93,24	95,73	0,01
1T	14	10	60	94,92	93,9	93,9	0,01
2K	16	18	90	94,87	93,1	109	0,01
2K	16	18	90	94,87	93,1	93,92	0,01
2T	16	18	90	94,5	92,81	93,88	0,01
3K	16	18	90	94,89	92,6	90	0,02
5K	16	18	90	94,84	93,1	94	0,01
5K	110	36	180	94,89	93,06	93,96	0,01
6K	16	18	90	94,87	93,14	93,91	0,01
7K	16	18	90	94,72	92,87	94,84	0,01
7K	16	18	90	94,47	92,89	97,34	0,01
7K	129	36	180	94,73	92,82	95,64	0,01
8K	16	18	90	94,83	92,99	95,56	0,003
9K	16	18	90	94,91	93,11	94	0,01
10K	16	18	90	94,83	93,05	93,95	0,01

Es wurden Peak-Effizienzen zwischen 94,5 % und 94,94 % sowie mittlere Effizienzen zwischen 92,81 % und 93,9 % erreicht. Die Overvoltage-Protection-Spannung lag im Regelfall zwischen 90 V und 97,34 V; nur in einer Messung mit einem Wert von 109 V war der Überspannungsschutz deaktiviert. Der Strom, ab dem der Konverter die Ausgangsspannung auf 80 V hochsetzt und damit korrekt arbeitet, lag bei 10 mA oder weniger. Diese Messergebnisse belegen, dass die Hardware die entworfenen Zielgrößen weitgehend erreicht und für den Projektbetrieb technisch geeignet ist.

Die gemessene Effizienz der Konverter bei Raumtemperatur wird in Abbildung 199 zusammengefasst. Die Konverter treten ab einem Eingangsstrom beziehungsweise ab einer Eingangsleistung von etwa 10 mA bzw. 0,2 W überhaupt in den geregelten Betrieb ein; in diesem Bereich liegt die Effizienz zunächst bei etwa 60 %. Bereits oberhalb von 0,5 W Eingangsleistung steigt sie auf mehr als 80 %, und im Bereich von etwa 2 W bis 20 W Eingangsleistung liegt die Effizienz der Konverter bei über 90 %. Diese Darstellung ist für die Einordnung des Demonstrators besonders wichtig, weil sie zeigt, dass die Elektronik gerade im für Solardachziegel relevanten mittleren Leistungsbereich effizient arbeitet und damit nicht nur in einem engen Nennpunkt, sondern über einen breiteren praktischen Arbeitsbereich einsatzfähig ist.

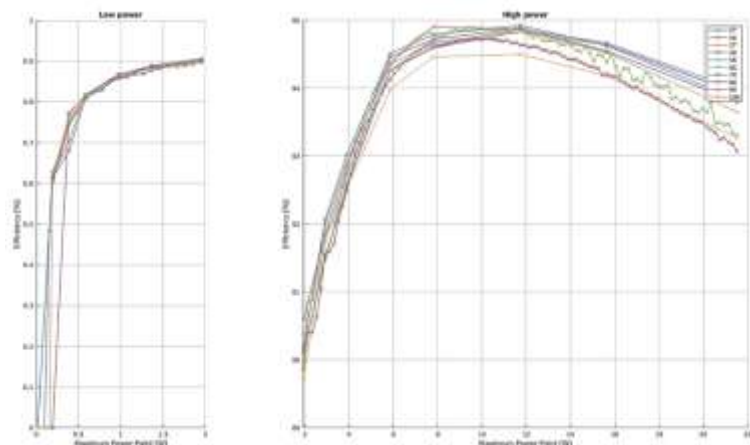


Abbildung 199: Gemessene Effizienz der Konverter über der Leistung bei Raumtemperatur (25°C) & ohne Gehäuse

Ein weiterer wesentlicher Untersuchungspunkt war die Temperaturabhängigkeit. Hierfür wurden Messungen bei 0 °C, -18 °C und 75 °C durchgeführt. Für die tiefen Temperaturen wurden zwei Konverter mit einer Polyurethan-Vergussmasse wasserdicht in ein Gehäuse eingegossen und in einem Eisbad beziehungsweise Salz-Eisbad auf die Zieltemperatur gebracht. Der Messaufbau ist in Abbildung 200 dokumentiert.

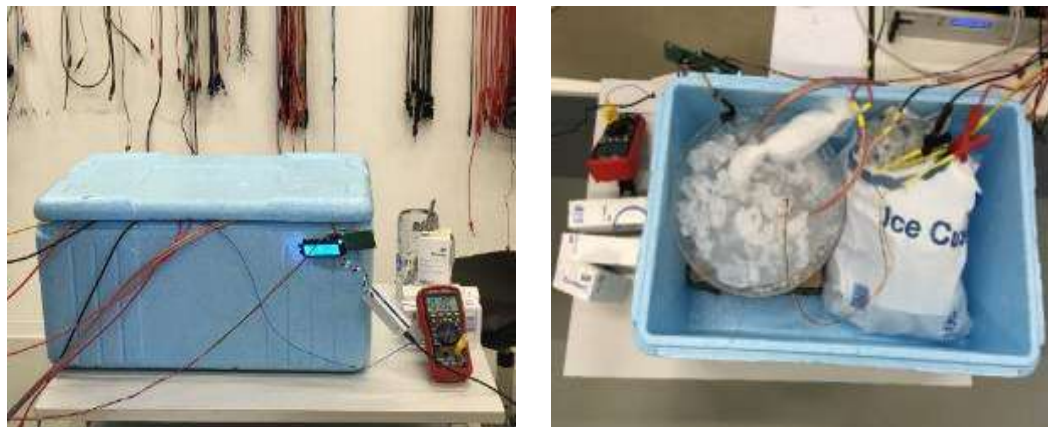


Abbildung 200: Bilder des Messaufbaus der Salz-Eisbadmessung bei -18°C

Die Messungen am Konverter 7K wurden jeweils mit 18 Messungen pro Arbeitspunkt und 90 s pro Arbeitspunkt durchgeführt; auch hier wurde die Eingangsleistung wieder von 0,02 W bis 21,52 W variiert. Die Ergebnisse fasst Tabelle 41 zusammen.

Tabelle 41: Aufführung der durchgeführten Messungen an Konverter 7K bei verschiedenen Temperaturen

Device	#AP	Temp [°C]	Gehäuse	Eff _{Peak} [%]	Eff _{Av} [%]	OV [V]	I _{Turn-On} [A]
7K	70	0°C	ja	94,85	92,88	98,66	0,01
7K	70	25°C	ja	94,72	92,8	98,01	0,01
7K	22	75°C	nein	94,43	92,55	96,53	0,01
7K	74	-18°C	ja	94,95	92,89	97,81	0,01

Danach liegen die Peak-Effizienzen zwischen 94,43 % und 94,95 % und die mittleren Effizienzen zwischen 92,55 % und 92,89 %, also praktisch auf dem Niveau der Raumtemperaturmessung. Damit wird belegt, dass der Demonstrator auch unter deutlich abweichenden thermischen Randbedingungen robust arbeitet.

Die zugehörigen Temperatur-Effizienz-Kurven sind in Abbildung 201 dargestellt. Es zeigte sich, dass bei höheren Leistungen von mehr als etwa 7,5 W die Effizienz bei einem Temperaturunterschied von rund 50 °C sogar um etwa 0,5 % steigen kann, was mit dem geringeren elektrischen Widerstand der Bauteile und Metallverbindungen bei wärmeren Bedingungen begründet wird. Bei niedrigeren Leistungen sinkt die Effizienz bei tiefen Temperaturen dagegen um bis zu 2 %, was plausibel auf einen erhöhten Ruhestromverbrauch der Elektronik zurückgeführt werden kann. Diese Abbildung ist fachlich besonders hilfreich, weil sie nicht nur absolute Effizienzwerte zeigt, sondern die Temperaturrobustheit des Systems differenziert über den Leistungsbereich bewertet.

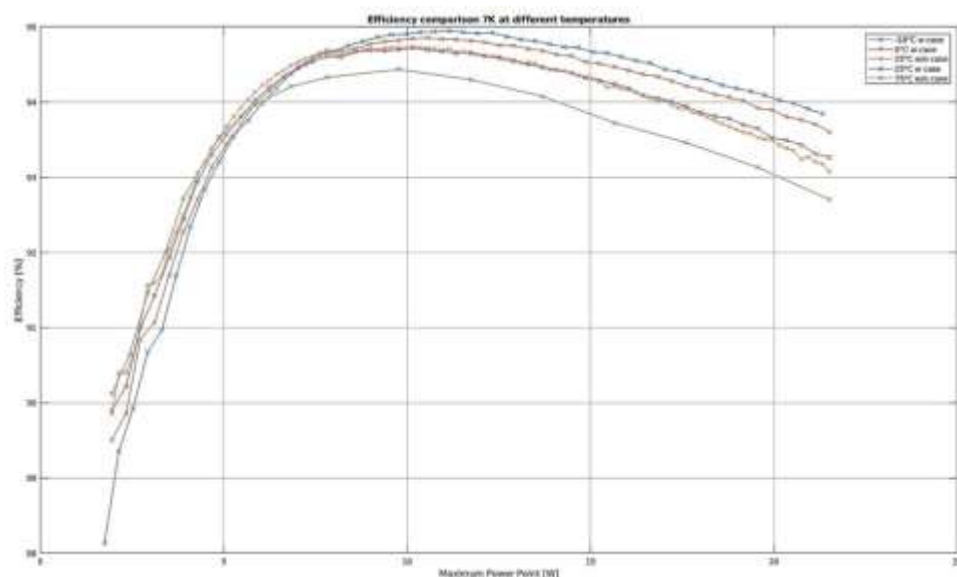


Abbildung 201: Effizienzkurven von Konverter 7K bei verschiedenen Temperaturen

In der zusammenfassenden Bewertung ist AP 2.4.4 damit als das eigentliche Hardware-Demonstratorarbeitspaket innerhalb der Entwicklung intelligenter PV-Dachsteine einzuordnen. Das Arbeitspaket überführt die in AP 2.4.2 entwickelte leistungselektronische Grundidee und die in AP 2.4.3 definierte modulare Schnittstellenlogik in einen real gefertigten, messtechnisch validierten Demonstrator. Mit den Entwicklungen und Analysen liegt eine geschlossene Linie vom Entwurf über die Fertigung bis zur Validierung vor. Besonders hervorzuheben ist, dass der Konverter nicht nur hohe Wirkungsgrade erreicht, sondern auch im unteren Leistungsbereich und unter unterschiedlichen Temperaturbedingungen funktionsfähig bleibt. AP 2.4.4 schließt damit den Entwicklungsstrang der intelligenten PV-Dachsteine technisch ab.

AP 2.5 schließt unmittelbar an die Arbeiten zu den photovoltaisch aktivierten Dachsteinen und deren leistungselektronischer Einbindung an. Nachdem in AP 2.4 gezeigt wurde, wie mit den entwickelten Dachsteinen elektrische Energie am Gebäude erzeugt und über angepasste Konverter mit vertretbaren Verlusten in das Gebäudesystem eingebracht werden kann, richtet sich der Fokus in AP 2.5 auf die Frage, ob und in welchem Umfang diese elektrische Energie zusätzlich zwischengespeichert werden soll. Ziel des Arbeitspakets war die Auswahl der zu verwendenden PV-Speicherbatterie sowie die Ermittlung der Anforderungen für das PV-System. Als geplante Arbeitsschritte werden die Spezifikation von Speicherkapazität und Spannungsklasse des ausgewählten Batteriespeichers sowie die Spezifikation der Anforderungen für den der Batterie vorgeschalteten Laderegler genannt. AP 2.5 ist damit als verbindendes Arbeitspaket zwischen photovoltaischer Erzeugung, Leistungsanpassung und elektrischer Speicherung zu verstehen.

Für die fachliche Einordnung des Arbeitspakets ist besonders wichtig, dass die Rolle elektrischer Speicher im Projekt nicht pauschal positiv, sondern differenziert bewertet. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass eine Speicherung der Energie der neuartigen Dachsteine mit Photovoltaik im Quartier nicht notwendig sei. Begründet wird dies damit, dass im Quartier die gesamte eingestrahelte Energie direkt genutzt werden könne, da nicht alle Dachflächen wirtschaftlich sinnvoll mit den neuen Dachsteinen belegt werden. Damit wird AP 2.5 bewusst von einer klassischen Maximierungslogik der Batteriespeicherung abgegrenzt. Der Speicher wird nicht als unverzichtbarer Kernbaustein des Quartierskonzepts verstanden, sondern als eine unter bestimmten Randbedingungen sinnvolle Ergänzung, deren Nutzen von der tatsächlichen Ausbaustufe der Dachflächen und vom unmittelbaren Verbrauch abhängt.

Gleichzeitig wird der Speicher nicht verworfen, sondern funktional auf den Demonstratorbetrieb bezogen. Für weitergehende Untersuchungen am Demonstrator wurde vom IWB ein kommerzieller Speicher gekauft und untersucht. Die Funktion des Batteriespeichers wird dabei klar benannt: Er soll die an einem sonnigen Tag geerntete, aber im Moment nicht benötigte Energie für den Verbrauch in der Nacht speichern. Sofern die Energie nicht im jeweiligen Objekt selbst genutzt werden kann, wird zudem die Möglichkeit einer Verteilung innerhalb oder außerhalb des Quartiers angesprochen. Damit wird deutlich, dass AP 2.5 die Stromspeicherung nicht als Selbstzweck behandelt, sondern als Mittel zur zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Nutzung im Gebäudekontext. Die Entscheidung für einen kommerziellen Speicher statt einer projektspezifischen Eigenentwicklung passt dabei zur Funktion des Arbeitspakets: Im Vordergrund stand hier nicht die Entwicklung einer neuen Speichertechnologie, sondern die Ableitung geeigneter Randbedingungen für ihre Einbindung.

Die Auslegung des Batteriespeichers wird ausdrücklich an die zuvor entwickelte PV-Systemarchitektur gekoppelt. Als Randbedingungen werden benannt, dass jeder Dachstein vier Solarstreifen enthält, die in Parallelschaltung betrieben werden, und dass jeder der vier Streifen eine Reihenschaltung von 20 Solarzellen umfasst. Weiter wird angegeben, dass jede Solarzelle eine Fläche von 39 mm × 13 mm benötigt. Aus dieser Konfiguration ergibt sich eine Leerlaufspannung von 12,92 V, ein Kurzschlussstrom von 0,78 A und eine rechnerisch maximale Leistung von 8,1 W bei einer Bestrahlung von 1000 W/m². Zugleich wird unmittelbar einschränkend erläutert, dass diese Leistung praktisch nicht erreicht werden kann, weil eine gleichzeitige Bestrahlung aller Streifen infolge der Eigenverschattung nicht möglich ist. Gerade diese Passage ist für AP 2.5 zentral, weil sie zeigt, dass die Speicherdimensionierung nicht auf idealisierten PV-Nennwerten beruhen darf, sondern an die reale elektrische Charakteristik der entwickelten Dachsteine anzupassen ist.

Daraus ergibt sich die eigentliche technische Leistung des Arbeitspakets: AP 2.5 formuliert die Anforderungen an Speicher und Laderegler nicht abstrakt, sondern aus den konkret entwickelten Eigenschaften der PV-Dachsteine heraus. Die notwendige Speicherkapazität ist an der tagsüber potenziell anfallenden, zeitweise nicht direkt nutzbaren Energie zu orientieren; die Spannungs-klasse des Speichers und die Anforderungen an den vorgeschalteten Laderegler müssen mit der vergleichsweise niedrigen und zugleich verschattungsabhängig schwankenden elektrischen Ausgangscharakteristik der Dachsteine kompatibel sein. Im Hintergrund wird dabei die in AP 2.4 entwickelte Leistungselektronik mitgedacht: Erst durch die dort erreichte Spannungsanhebung und Systemeinbindung entsteht überhaupt eine tragfähige Grundlage, auf der ein Batteriespeicher sinnvoll angeschlossen werden kann. AP 2.5 ist damit weniger ein eigenständiges Technologieentwicklungsarbeitspaket als vielmehr eine systemtechnische Präzisierung der Schnittstelle zwischen PV-Erzeugung und elektrischer Speicherung.

In der Zusammenfassung ist AP 2.5 somit als kompaktes, aber systemisch wichtiges Einordnungsarbeitspaket zu verstehen. Es zeigt erstens, dass eine quartiersweite elektrische Speicherung im konkreten EnQM-Ansatz nicht zwingend erforderlich war, weil die erzeugte Energie bei begrenztem wirtschaftlich sinnvollem Dachstein-Ausbau grundsätzlich direkt genutzt werden konnte. Zweitens konkretisiert es die funktionale Rolle eines Batteriespeichers für den Demonstratorbetrieb, nämlich die Verschiebung tagsüber erzeugter Überschüsse in die Nacht. Drittens leitet es die maßgeblichen Randbedingungen für Speicher und Laderegler direkt aus der elektrischen Konfiguration der aktivierten Dachsteine ab.

AP 2.6.1 hatte die Aufgabe, die werkstoffliche und konstruktive Grundlage für eine gebäude- und quartiersintegrierte Wärmespeicherung im LowEx-Kontext zu schaffen. Ziel war die Entwicklung thermischer Speicher aus Betonfertigteilen mit Füllung aus Latentwärmematerialien zum Einbau

außerhalb der Gebäudehülle im Erdreich. Der Antrag nennt hierfür als Arbeitsschritte numerische Untersuchungen zum thermischen und hygrischen Verhalten des Speichers unter dem Einfluss von Speichermedium und umgebendem Erdreich, die Entwicklung eines selbstverdichtenden Hochleistungsbetons für die Speicherbauteile, die Analyse thermisch bedingter Beanspruchungen der Stahlbetonwandungen, die Prüfung der chemischen Beständigkeit gegenüber Phasenwechselmaterialien sowie Simulationsrechnungen zum Wärmeverhalten gedämmter, im Erdreich eingebauter Speicher. AP 2.6.1 ist damit als werkstofflich-konstruktives Grundsatzarbeitspaket zu verstehen, das die Brücke zwischen Speicheridee, Materialwahl und technischer Einsetzbarkeit herstellt.

Zu Beginn des Arbeitspakets 2.6.2 stand die Untersuchung eines unterirdischen Betonwärmespeichers mit Wasserfüllung als referenzierbare Ausgangslösung. Hierzu wurden numerische Analysen mit dem FE-Programm DELPHIN 4 durchgeführt, um den Wärme- und Feuchtehaushalt des Speichers und des angrenzenden Erdreichs zu beschreiben. Im Mittelpunkt standen dabei die Fragen, welcher Energieverlust vom Speicher in das Erdreich zu erwarten ist, in welchem Umfang Wandung, Deckel und Boden zu dämmen sind und wie stark sich das Erdreich in Abhängigkeit von der Dämmstärke erwärmt. Die dafür angesetzten geometrischen und materialtechnischen Randbedingungen sind in Tabelle 41 zusammengefasst; dort werden unter anderem ein Behältervolumen von 2,74 m³, ein Durchmesser von 1,50 m, Wandstärken von 0,12 m sowie unterschiedliche Seitendämmstärken von 0,125 m, 0,25 m und 0,40 m ausgewiesen.

Tabelle 42: Materialdaten Speicherberechnungen

Behältervolumen	2,74 m ³
Behälterhöhe	1,55 m
Behälterdurchmesser	1,50 m
Wandstärke	0,12 m
Bodenstärke	0,15 m
Deckenstärke	0,20 m
Dicke der Seitendämmung	0,125 m; 0,25 m; 0,40 m
Dicke der Bodendämmung	0,20 m
Dicke der Deckendämmung	0,20 m
λ Seitendämmung	0,046 W/mK
λ Bodendämmung	0,045 W/mK
λ Deckendämmung	0,045 W/mK

Für diese Vorstudien wurde das Speichermedium bewusst bis auf 60 °C geführt, obwohl das Quartierskonzept auf LowEx-Komponenten ausgerichtet ist. Dies wird begründet, dass auf diese Weise die Wärmeverluste auch für höhere Temperaturniveaus abgeschätzt werden können und zugleich der Einsatz handelsüblicher Betonspeicher ohne zusätzliche wasserseitige Beschichtung möglich bleibt. Der daraus resultierende Wärmeinhalt des mit Wasser beladenen Speichers wird in Abbildung 202 und Abbildung 203 veranschaulicht. Die eigentliche technische Aussage der Vorstudie ergibt sich jedoch aus Abbildung 203 und Abbildung 205: Beide Darstellungen zeigen, dass ungedämmte Betonbehälter hohe Wärmeverluste aufweisen und dass für einen wirtschaftlich und technisch sinnvollen Betrieb sowohl die Dämmung der Behälterwandung als auch die des Deckels und des Bodens erforderlich ist. Damit wurde früh nachgewiesen, dass ein Betonspeicher nur in Kombination mit einer wirksamen Außendämmung sinnvoll betrieben werden kann.

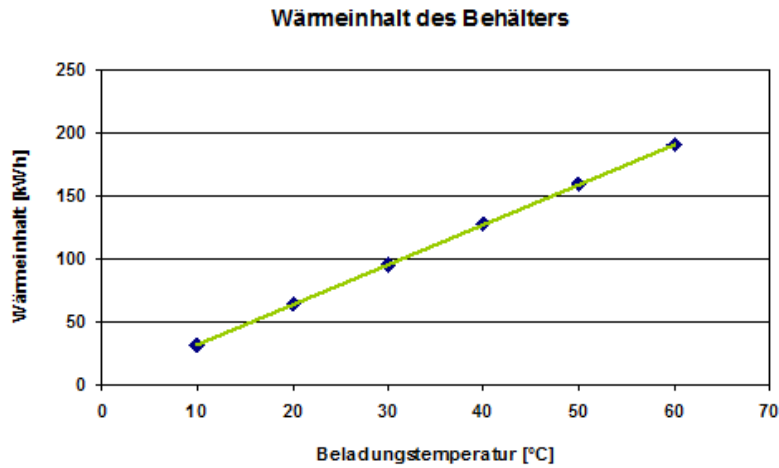


Abbildung 202: Wärmeinhalt des mit Wasser beladenen Betonwärmespeicher abhängig der Beladungs-temperatur

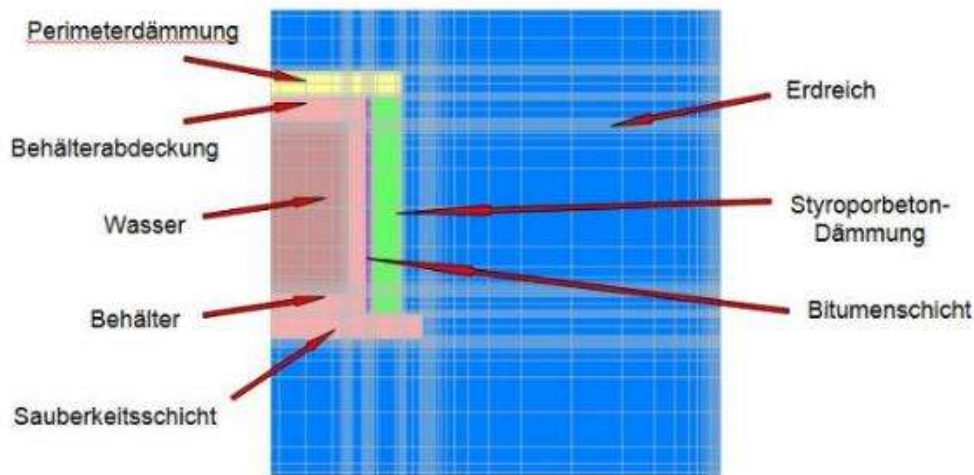


Abbildung 203: Wärmeinhalt des mit Wasser beladenen Betonwärmespeicher abhängig der Beladungs-temperatur

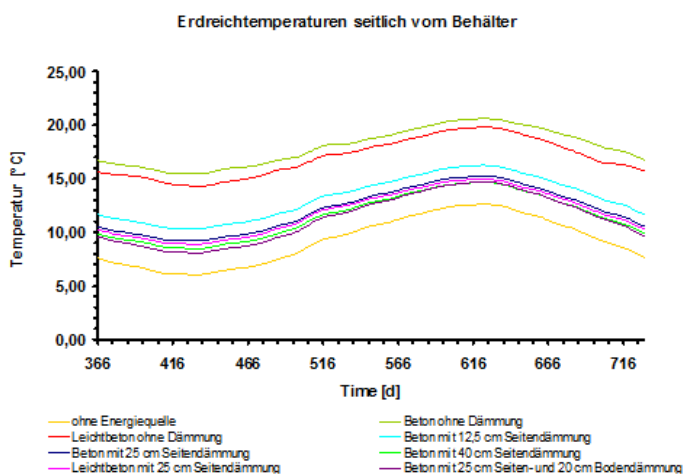


Abbildung 204: Erdreichtemperaturen in einer Tiefe von 2,5 m und in einer Entfernung von 10 cm von der außenseitigen Behälteroberfläche

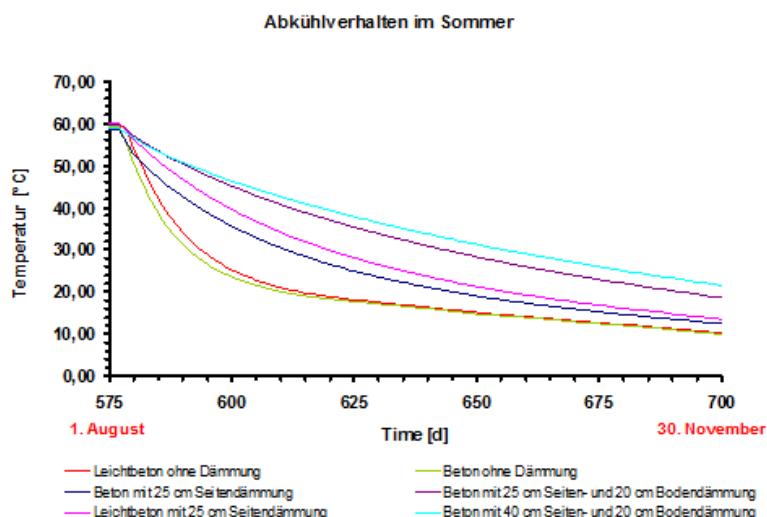


Abbildung 205: Abkühlverhalten des Speichers im Sommer abhängig der realisierten Dämmmaßnahme

An diese Vorstudien schloss die werkstoffliche Weiterentwicklung unmittelbar an. Am IWB wurden neue Bindemittelkonzepte für leistungsfähigere spritzbare mineralische Dämmstoffe entwickelt, die für die wärmetechnische Ertüchtigung der Betonbehälter vorgesehen sind. Gleichzeitig wurde ein erster prototypischer Betonwärmespeicher im Demonstrator „Birkhof“ an der Universität Stuttgart installiert; der Einbau ist in Abbildung 206 dokumentiert. Damit bleibt AP 2.6.1 nicht auf die numerische Analyse beschränkt, sondern führt die Ergebnisse bereits in einen realen Demonstrator über.



Abbildung 206: Einbau Demonstrator

Im weiteren Verlauf des Arbeitspakets wurde die Speicherkonzeption von einem sensiblen Wasserspeicher auf einen Latentwärmespeicher mit PCM weiterentwickelt. Der vorliegende Schlussbericht begründet diesen Schritt ausdrücklich damit, dass bei einem PCM-Speicher – anders als bei einem reinen Wasserspeicher – keine deutliche Erhöhung der Rücklauftemperatur erforderlich ist und die Wärmepumpe deshalb im Bereich des Phasenwechsels mit vergleichsweise konstant hohem COP betrieben werden kann. Zugleich zeigte sich jedoch früh, dass marktgängige Salzhydrate für das Vorhaben nicht geeignet sind: Beschrieben werden inkongruentes Schmelzverhalten, Phasentrennung infolge von Dichteunterschieden, eine Verlagerung des Phasenwechselbereichs mit zunehmender Zyklenzahl sowie Unterkühlungseffekte, die den effizienten Wärmepumpenbetrieb zusätzlich verschlechtern würden. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, die vertiefte Untersuchung von Salzhydraten nicht weiterzuverfolgen und stattdessen Paraffine sowie biobasierte PCM in den Mittelpunkt zu stellen.

Für die Bewertung dieser PCM wurden zunächst geeignete Charakterisierungsmethoden entwickelt. Der vorliegende Schlussbericht beschreibt einerseits ein modifiziertes Betonkalorimeter für

kleinere Probenmengen bis 125 ml, andererseits die Konzeption und den Aufbau eines größeren Prüfstands mit integriertem Wärmetauscher für technisch aussagekräftige Untersuchungen. Die dafür angesetzten Randbedingungen sind in Tabelle 43 zusammengefasst; berücksichtigt werden dort unter anderem ein Wärmeträger-Massenstrom von 0,05 bis 0,0833 kg/s, eine Prüfkörperlänge von 1 m, definierte Radien und Anfangstemperaturen sowie Lade- und Entladetemperaturen von 50 °C beziehungsweise 10 °C.

Tabelle 43: Ausgangsbedingungen

Parameter	Wert	Einheit
$\dot{m}_{\text{HTF}}^*$	0.05 – 0.0833	kg/s
$L(z)$	1	m
r_0	0.033	m
R	0.125	m
N_p	1	-
T_0 (of HTF and PCM**)	20 (293.15)	°C (K)
$T_{\text{HTF, charging}}$	50 (323.15)	°C (K)
$T_{\text{HTF, discharging}}$	10 (283.15)	°C (K)

* HTF: Heat Transfer Fluid; hier eine Mischung aus Wasser und Glykol

** PCM: Phase Change Material

Der Aufbau des Prüfstands und seiner Komponenten wird über Abbildung 207, Abbildung 208, Abbildung 209, Abbildung 210 und Abbildung 211 nachvollziehbar dokumentiert.

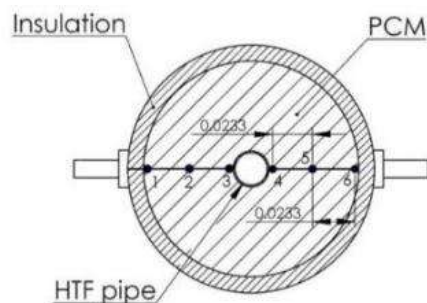


Abbildung 207: Schnitt durch den PCM-Versuchsprüfkörper mit mittlerer Führung des Wärmeträgerfluids innerhalb des Kupferrohrs und Darstellung der Anordnung der 6 Temperaturfühler zur Kontrolle der Temperaturverteilung

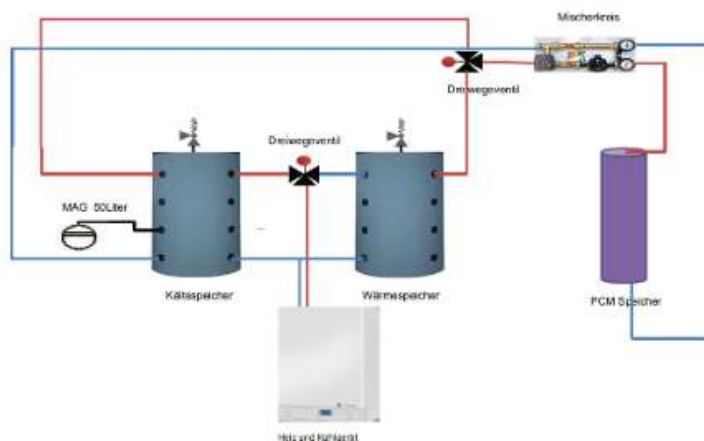
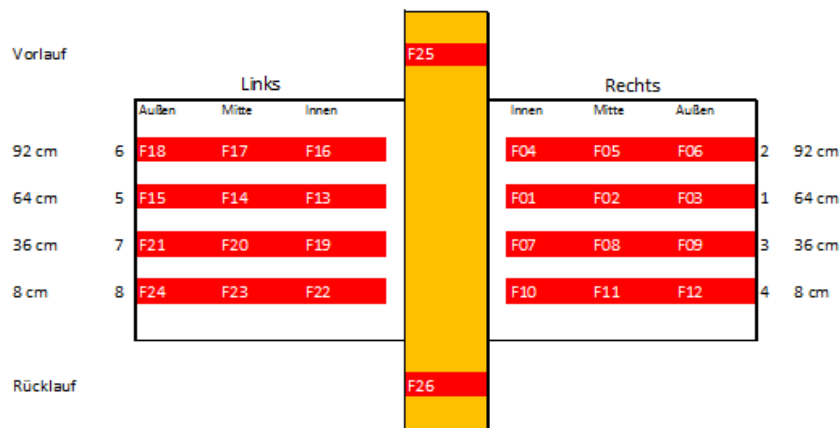


Abbildung 208: Hydraulisches Schema des PCM-Prüfstands

Sensoranordnung



a)



b)



c)

Abbildung 209: Anordnung der Temperatursensoren (a) Bezeichnung und schematische Verteilung der Temperatursensoren (b, c) Installation der Temperatursensoren



a)



b)

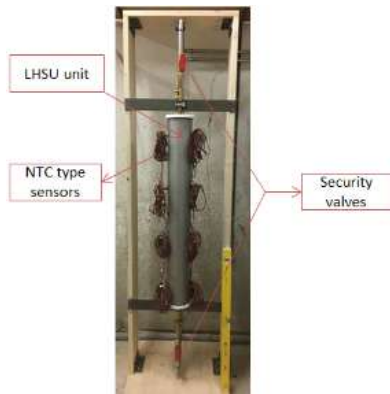


c)



d)

Abbildung 210: Hauptkomponenten des PCM-MSR-Konzepts: a) Erfassung Temperaturen b) Erfassung Regelung Aktoren c) Relais-Einheit d) MSR-Leitrechner



a)



b)



c)



d)

Abbildung 211: PCM-Prüfstand a) LHSU b) Wassertanks zur Bevorratung von Wasser auf einem Temperaturniveau oberhalb und unterhalb der Phasenwechseltemperatur c) Dreiwegeventile und Druckbehälter d) Mischsystem

Diese Gruppe von Abbildungen, zeigt, dass die PCM-Untersuchungen nicht auf Stoffdatenblättern beruhen, sondern auf einem eigens entwickelten und instrumentierten Prüfstand. Die materialspezifische Auswahl der PCM wird in Tabelle 44 konkretisiert. Verglichen werden dort das Paraffin RT 28 HC und das biobasierte PureTemp 28.

Tabelle 44: PCM-Spezifikationen (Herstellerangaben)

Parameter	RT 28 HC	PureTEMP 28	Einheit
Schmelzpunkt (Zone)	27-29	28	°C
Wärmespeicherkapazität	250 ($\pm 7,5\%$)	190	kJ/kg
Wärmeleitfähigkeit (flüssig)	0,2	0,15	W/mK
Wärmeleitfähigkeit (fest)		0,25	
Dichte (flüssig)	770	860	kg/m ³
Dichte (fest)	880	950	
Spezifische Wärme (flüssig)	2	2,54	KJ/kgK
Spezifische Wärme (fest)		2,34	

Beide Materialien liegen mit ihrem Schmelzbereich im angestrebten LowEx-Temperaturfenster um etwa 28 °C, unterscheiden sich jedoch bei Wärmespeicherkapazität, Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifischer Wärme. Auf dieser Grundlage wurden beide Materialien im Prüfstand untersucht. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse für Paraffin werden in Abbildung 212, Abbildung 213 und Abbildung 214 dargestellt.

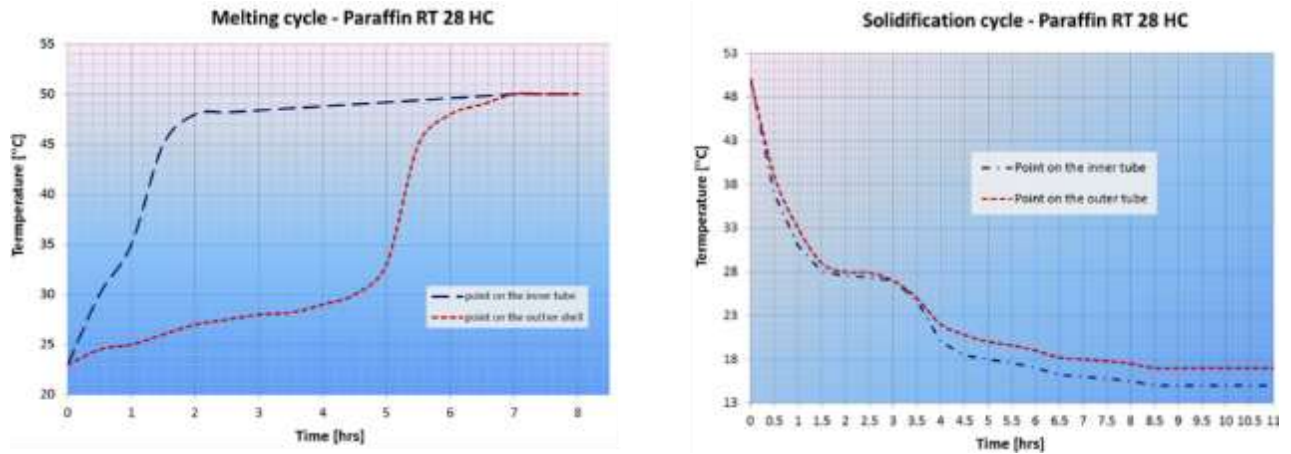


Abbildung 212: Experimentelle Ergebnisse am Paraffinwachs als Phasenwechselmaterial - Schmelz- und Erstarrungszyklus

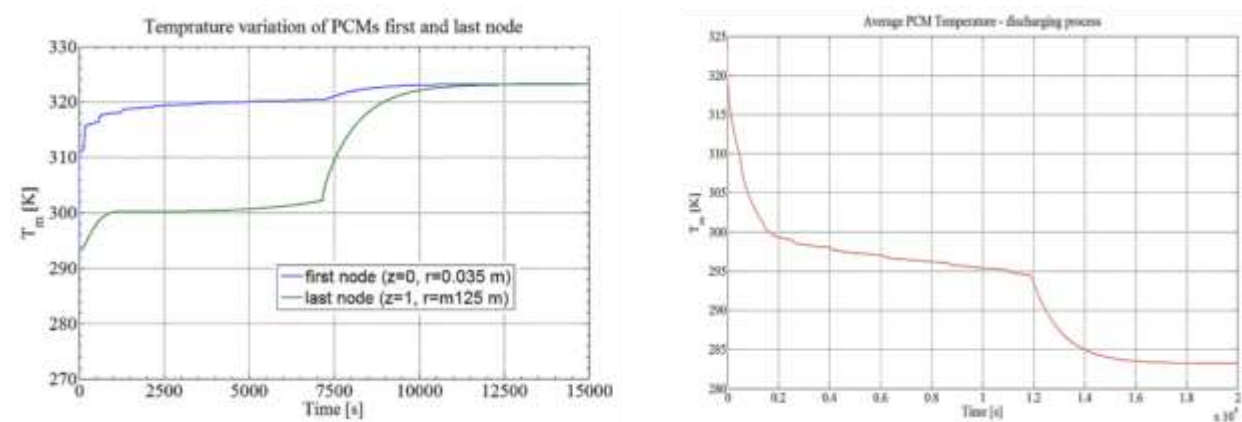


Abbildung 213: Simulation results of Paraffin wax as PCM

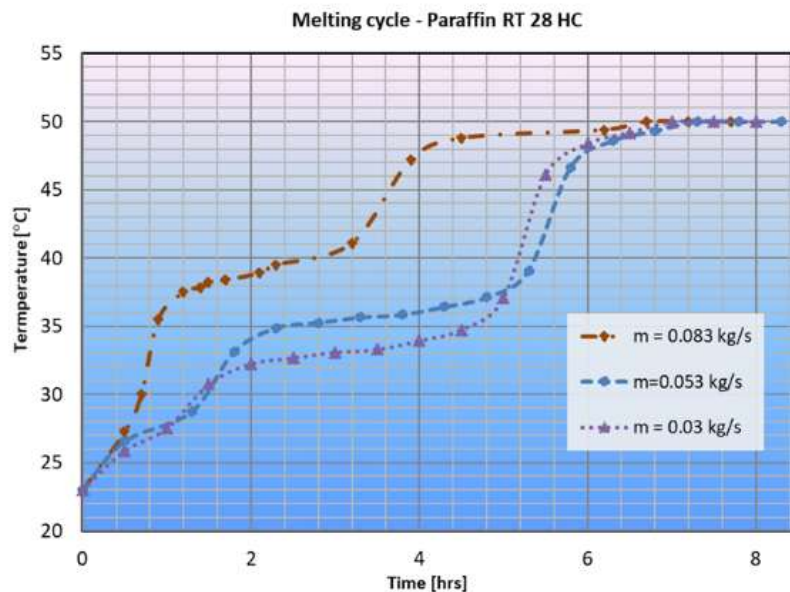


Abbildung 214: Experimentelle Ergebnisse von Paraffinwachs als PCM - Einfluss des HTF-Massenstroms auf die Schmelzzeiten

Es zeigt sich hier eine vergleichsweise gute Übereinstimmung von Versuch und Simulation; der Phasenwechsel setzt demnach in der Simulation nach etwa 3 Stunden, im Experiment im Mittel

nach etwa 3,5 Stunden ein. Gleichzeitig wird deutlich, dass der Massenstrom des Wärmeträgerfluids die Beladedynamik maßgeblich beeinflusst und dass höhere Massenströme die Wärmeübertragung und damit die Beladung deutlich beschleunigen.

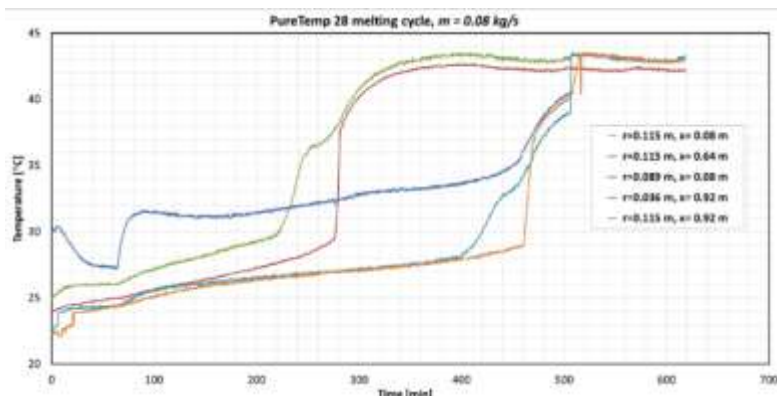


Abbildung 215: Experimentelle Ergebnisse von PureTemp 28 als PCM

Der Vergleich mit dem biobasierten PCM erfolgt über Abbildung 215. Hier konnte ein grundsätzlich ähnliches thermisches Verhalten wie beim Paraffin, allerdings mit einem vollständigen Schmelzaufschluss nach etwa 4,5 Stunden, festgestellt werden. Für die Bewertung ist hervorzuheben, dass biobasierte PCM eine schnelle Reaktion, hohe thermische Stabilität und ökologische Vorteile besitzen; zudem werden für größere Abnahmemengen günstigere Kosten als für paraffinbasierte PCM genannt. Zugleich wird aber auch festgehalten, dass für biobasierte PCM noch zu wenige Langzeiterfahrungen vorliegen und die Verfügbarkeit des amerikanischen Produkts nicht abschließend gesichert ist. Deshalb wurde für die weiteren Überlegungen des Projekts vorsorglich weiterhin das marktverfügbare Paraffin RT18HC herangezogen.

Den Übergang von der Material- und Prüfstandsebene zur konkreten Speichergeometrie bildet schließlich Abbildung 216. Hierfür wurde ein Betonspeichersystem mit säulenartigen Kunststoffbehältern zur Aufnahme des PCM in spiralförmiger Anordnung konzipiert; das Volumenverhältnis von Wasser zu PCM beträgt dabei etwa 2:1. Zugleich wird festgehalten, dass die aus den hybriden Dachsteinen zugeführte Wärmeträgerflüssigkeit je nach Witterung Temperaturen zwischen 10 °C und 50 °C aufweisen kann und dass parallel zu den CFD-Untersuchungen auch Regelstrategien erarbeitet werden, um Umweltwärme entweder zur Rekuperation der Erdwärmesonden, zur Beladung des PCM-Speichers oder zur direkten Gebäudenutzung einzusetzen. Damit wird deutlich, dass AP 2.6.1 nicht bei der Werkstoffcharakterisierung stehenbleibt, sondern die entwickelte Speicherlösung bereits in das spätere LowEx-Gesamtsystem einordnet.

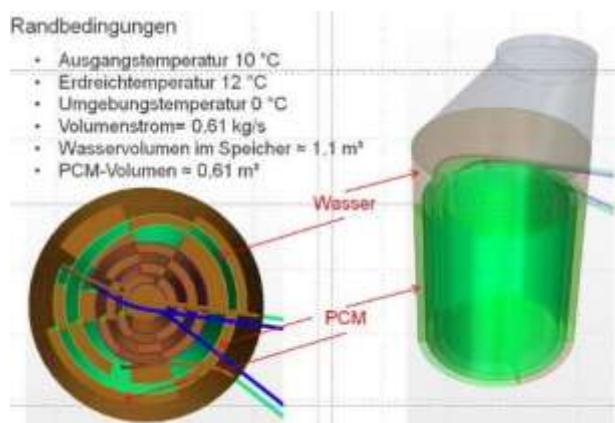


Abbildung 216: Darstellung des Betonwärmespeichers mit den säulenartigen Kunststoffbehältern zur Aufnahme des PCM und deren spiralförmige Anordnung

Zusammenfassend ist AP 2.6.1 damit als ein zentrales werkstofflich-konstruktives Entwicklungsarbeitspaket innerhalb von Teilprojekt 2 einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass unterirdische Betonspeicher ohne wirksame Dämmung thermisch nicht sinnvoll betrieben werden können und dass die Speicherwandung, der Deckel und der Boden gleichermaßen in die Dämmstrategie einzubeziehen sind. Zweitens wird mit Tabelle 42 sowie Abbildung 202 bis Abbildung 205 eine belastbare Grundlage für die Entwicklung gedämmter Betonwärmespeicher geschaffen. Drittens werden mit Tabelle 43, Tabelle 44 sowie Abbildung 212 bis Abbildung 216 die material- und prüftechnischen Voraussetzungen dafür geschaffen, PCM-Speicher nicht nur konzeptionell, sondern experimentell und numerisch abgesichert in das LowEx-Konzept einzubinden.

AP 2.6.2 baut unmittelbar auf den werkstofflichen und konstruktiven Ergebnissen aus AP 2.6.1 auf. Nachdem dort die materialtechnischen Grundlagen des Wärmespeichers, die thermische Einordnung von Wasser- und PCM-basierten Speicheransätzen sowie der Versuchsaufbau für die experimentelle Untersuchung entwickelt worden waren, richtete sich der Fokus nun auf die systemische Bewertung und dynamische Modellierung des Speichers. Ziel des Arbeitspakets war die Bewertung und Auswahl des zu verwendenden Speichersystems sowie die dynamische Simulation des thermischen Verhaltens des Speicherdemonstrators. Die geplanten Arbeitsschritte umfassten hierzu die Analyse zentraler und dezentraler Speicheransätze im Wohnquartier, die Entwicklung und Programmierung des Wärmespeichers in Modelica, die Erarbeitung eines Monitoringkonzepts für den Demonstrator, die Validierung der Modelle anhand von Messdaten sowie die Bereitstellung der Modellergebnisse zur Unterstützung der weiteren Forschungsarbeiten am Wärmespeicher. AP 2.6.2 übernimmt damit die Funktion, die in AP 2.6.1 entwickelten Speicherkonzepte in einen quartiers- und systembezogenen Bewertungsrahmen zu überführen.

Ein erster Schwerpunkt des Arbeitspakets lag auf dem Vergleich von zentralen und dezentralen Wärmespeichern. Es kann festgestellt werden, dass beide Ansätze unter mehreren Gesichtspunkten zu bewerten sind. Dezentrale Speicher besitzen den Vorteil kurzer Transportwege und damit geringer Übertragungsverluste. Zentrale Speicher weisen demgegenüber ein günstigeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen auf, sodass geringere Speicherverluste auftreten können. Hinzu kommt, dass durch die Vernetzung mehrerer Gebäude über einen zentralen Speicher die Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Bedarf erhöht und gegebenenfalls auch die notwendige Speichergroße reduziert werden kann. Der räumliche Zusammenhang dieser Komponenten wird in Abbildung 217 dargestellt.



Abbildung 217: Räumlicher Zusammenhang der Senke, der Quelle und des Speichers. Dabei können sich alle Komponenten im selben Gebäude befinden oder über mehrere Gebäude hinweg vernetzt und auch mehrfach vorhanden sein

Zur Bewertung der räumlichen Einsetzbarkeit von zentralen und dezentralen Wärmespeichern wird ein Kennwert K definiert. Der Kennwert ist abhängig von dem Übertragungswirkungsgrad η , der verlustrelevanten Strecke X zwischen Quellen und zentralem Speicher und zentralem Speicher und Senken und der Differenz der Speicherverluste aller dezentralen Speicher Q_{VD} und der Speicherverluste des zentralen Speichers Q_{VZ} . Für $Q_{VD} > Q_{VZ}$ hat die Lösung mit zentralem Spei-

cher insgesamt geringere Energieverluste als die mit dezentralen Speichern, wenn der Kennwert kleiner eins ist:

$$K = \frac{\sum \eta \cdot (x_n + y_n)}{\sum q_{VDn} - Q_{VZ}} = \frac{\eta \cdot X}{Q_{VD} - Q_{VZ}}$$

für $K > 1$: $\eta \cdot X > Q_{VD} - Q_{VZ}$
 für $K < 1$: $\eta \cdot X < Q_{VD} - Q_{VZ}$

Der beschriebene Ansatz wurde in einem Excel-Tool umgesetzt. Mit diesem Tool kann das Gesamtsystem bestehend aus mehreren Gebäuden, die jeweils mit Solardachsteinen, einer Wärmepumpe und einem dezentralen Speicher ausgestattet sind, mit einem analog aufgebauten System, das statt der dezentralen einen zentralen Speicher enthält, gegenübergestellt werden. Die Parametrisierung des Tools erfolgt über die Eingabe der relevanten Temperaturniveaus, der Wärmeleitfähigkeiten, der jährlichen Betriebsstunden der Systeme und der Speichergößen- bzw. -abständen. Über die mit diesen Angaben errechneten Wärmeverlusten wird dann entweder das Volumen bestimmt, ab dem ein zentraler Speicher energetisch günstiger ist als die entsprechenden dezentralen Speicher oder der durchschnittliche Abstand der betreffenden Gebäude zu dem zentralen Speicher, bis zu dem dieser die energetisch günstigere Variante darstellt. Damit leistet AP 2.6.2 eine wichtige Zwischenstufe zwischen der rein stofflich-konstruktiven Speicherentwicklung und der späteren quartiersbezogenen Gesamtmodellierung. Ein exemplarisches Ergebnis dieser Vergleichsrechnung wird in Abbildung 218 dargestellt.

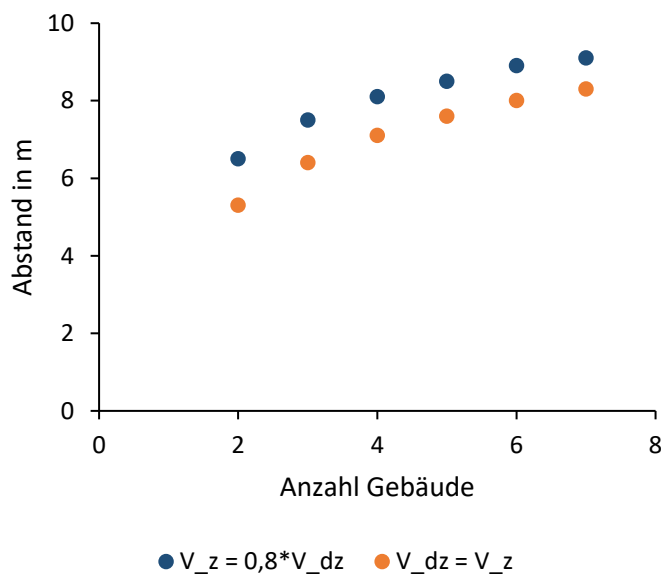


Abbildung 218: Abstand je Gebäude von dem zentralen Speicher, sodass $K = 1$ bei unterschiedlichen Volumenverhältnissen des zentralen zu den dezentralen Speichern.

Beispielhaft wurde für unterschiedliche Anzahlen angeschlossener Gebäude der mittlere Abstand bestimmt, bei dem die Energieverluste zentraler und dezentraler Speicher gleich groß sind. Dabei wird eine Speichertemperatur von 15 °C und eine durchschnittliche Temperatur von 35 °C beim Wärmetransport von den Solardachsteinen zum Speicher zu Grunde gelegt. Das Volumen des zentralen Speichers V_z wurde vergleichend einmal genauso groß wie das gesamte Volumen der dezentralen Speicher V_{dz} und einmal 0,8-mal so groß angenommen, da durch die Vernetzung, wie oben beschrieben, gegebenenfalls eine Verringerung des Volumens des zentralen Speichers möglich ist. Mit den festgelegten Parametern kann der Abstand der Gebäude vom zentralen Speicher mit steigender Anzahl von Gebäuden, die an den zentralen Speicher angeschlossen sind,

größer werden. Das heißt, die Wärmeverluste über die Oberflächen der dezentralen Speicher gleichen die Verluste durch längere Leitungen zum zentralen Speicher bis zu einem gewissen Punkt aus. Bei der Größenordnung von möglichen Abständen der Gebäude zu dem zentralen Speicher für diese Konfiguration kann davon ausgegangen werden, dass im Quartier teilweise zentrale Speicher die energieeffizientere Wahl darstellen können, besonders, wenn dadurch das Gesamtspeichervolumen verringert werden kann.

Zusätzlich wird aufbauend auf ein bestehendes Wärmespeichermodell der Modelica Bibliothek TransiEnt ein Modell eines zylindrischen Phasenwechselspeichers mit einem mittigen wärmeleitenden Rohr erstellt, um den Versuchsaufbau des IWB abzubilden. Das erstellte zylindrische Modell bietet die Möglichkeit, die Stoffeigenschaften des Phasenwechselmaterials, die Abmessungen des Speichers und die Diskretisierung des Speichervolumens zu variieren. Die Diskretisierung erfolgt in axialer und radialer Richtung und für die sich daraus ergebenden Volumenelemente werden jeweils einheitliche Temperaturen und thermodynamische Eigenschaften angenommen. Als Input können der Massenstrom und die Temperatur des Wärmeträgerfluids variiert werden.

Das erstellte Modell besteht aus vier Untermodellen, ein Untermodell beschreibt die Wärmeabgabe des Wärmeträgerfluids an das Phasenwechselmaterial, ein anderes die Wärmeleitung in horizontaler Richtung und ein Drittes die Wärmeleitung in vertikaler Richtung. In dem letzten Untermodell werden alle Wärmeflüsse zusammengeführt und für die Volumenelemente jeweils die sich neu einstellenden Temperaturen und Wärmeleitfähigkeiten berechnet.

Die Modellstruktur ist in Abbildung 219 dargestellt. Durch den modularen Aufbau können die einzelnen Untermodelle leicht durch ähnliche Modelle ersetzt werden, sodass der Detailgrad variiert werden kann.

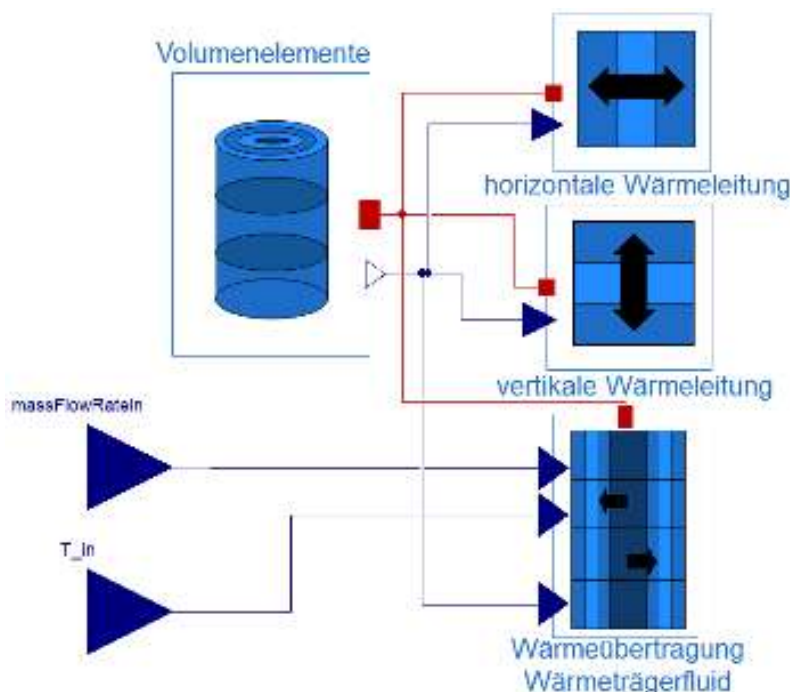


Abbildung 219: Aufbau des Modelica Modells eines Phasenwechselspeichers mit einem wärmeleitenden Rohr

Zusätzlich wurde ein rein energiebasiertes Modell des Phasenwechselspeichers erstellt, das auf der Bilanz der zugeführten und nachgefragten Energiemenge beruht und die Temperatur im gesamten Speicher als homogen annimmt.

Der Modelica-Ansatz erlaubt es, die Speicherkomponente in größere gebäude- und systemtechnische Modelle einzubinden und ihr Verhalten unter wechselnden Betriebsbedingungen zu untersuchen. Damit wird die Speicherentwicklung in AP 2.6 nicht auf einen Laboraufbau begrenzt, sondern in Richtung eines anwendungsbezogenen Demonstrators und einer späteren Systemintegration weitergeführt.

In der zusammenfassenden Bewertung ist AP 2.6.2 damit als das systemanalytische und modellbasierte Ergänzungsarbeitspaket zu AP 2.6.1 einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass die Wahl zwischen zentralen und dezentralen Wärmespeichern im Quartier von einem klar beschreibbaren Verhältnis aus Speicherverlusten und Übertragungsverlusten abhängt und nicht pauschal entschieden werden kann. Zweitens wird mit Abbildung 217 und Abbildung 218 ein nachvollziehbarer Bewertungsrahmen für diese Entscheidung geschaffen. Drittens wird mit Abbildung 219 die Grundlage dafür gelegt, den entwickelten PCM-Speicher dynamisch abzubilden, mit Messdaten zu validieren und später in weitergehende Systemmodelle einzubinden. AP 2.6.2 schließt damit den Themenkomplex der Wärmespeicherung in Teilprojekt 2 ab.

AP 2.7 schließt inhaltlich an die vorangegangenen Arbeitspakete zu Erzeugung, Speicherung und systemischer Integration an. Während in AP 2.4 bis AP 2.6 die technischen Komponenten für eine elektrische und thermische Vernetzung entwickelt und bewertet wurden, richtet sich der Fokus nun auf die Frage, wie die hierfür erforderlichen Mess- und Zustandsdaten in den Gebäuden zuverlässig erfasst, übertragen und für eine spätere Quartiersvernetzung verfügbar gemacht werden können. Ziel des Arbeitspakets war die Prüfung des möglichen Ausbaus der Kommunikationsnetze für die spätere Quartiersvernetzung. Als geplante Arbeitsschritte werden die Auswahl geeigneter Smart Meter für das Monitoring der denkmalgeschützten Bauten, der Einbau der ausgewählten Smart Meter sowie die Schnittstellendefinition und -entwicklung für eine Quartiersvernetzung benannt. AP 2.7 ist damit als infrastrukturelles Grundlagenarbeitspaket zu verstehen, das die informationstechnische Voraussetzung für die spätere digitale Systemkopplung schafft.

Ein erster Schwerpunkt des Arbeitspakets lag auf der Auswahl und Beschaffung geeigneter Messinfrastruktur für Strom-, Gas- und Wärmedaten. Die installierte Kommunikationsstruktur wurde so ausgelegt, dass sie die heterogenen Zählersituationen im Bestand berücksichtigen kann. Es wird ausdrücklich zwischen zwei Konstellationen unterschieden, in denen sich die Zähler in den Wohnungen beziehungsweise auf den Etagen befinden, und solchen, bei denen die gesamte Zählerinfrastruktur in den Kellern angeordnet ist. Diese Differenzierung ist für die Margarethenhöhe von hoher praktischer Bedeutung, weil die historische Gebäudestruktur keine einheitliche Installationssituation bietet und die Kommunikationslösung deshalb an unterschiedliche räumliche und technische Ausgangslagen angepasst werden musste. Gerade darin zeigt sich der Bezug zum denkmalgeschützten Bestand: Die Kommunikationsnetze konnten nicht nach einem starren Standardschema aufgebaut werden, sondern mussten objektspezifisch auf die vorhandene Zählerstruktur reagieren.

Für Zähler, die sich auf den Etagen befinden, wurde Auslesung über den LoRa-Funkstandard vorgesehen. Für im Keller verbaute Zähler wurde demgegenüber ein zentraler Gebäudehub konzipiert, der gegebenenfalls ebenfalls mit einem LoRa-Funkmodul ausgestattet werden kann und an den die im Keller eingebauten Zähler über MBus angeschlossen werden. Die Kommunikation zwischen Gebäudehub und Messplattform erfolgt über die COAX-Internet-Anbindung der STG Kommunikations- und Nachrichtentechnik GmbH. Diese Struktur ist fachlich bedeutsam, weil sie eine mehrstufige Kommunikationsarchitektur beschreibt: lokale Erfassung auf Gebäudeebene, Bündelung über einen Hub und anschließende Übertragung an eine zentrale Messplattform. Für die Schlussdarstellung sollte dieser Punkt ausdrücklich herausgearbeitet werden, da hier bereits die Grundlage einer späteren gebäudeübergreifenden Vernetzung sichtbar wird.

Ein weiterer relevanter Aspekt des Arbeitspakets ist die definierte Flexibilität der Messwerterfassung. Das Intervall der Datenerfassung je Sparte in Abhängigkeit von der eingebauten Zählrichtung kann zwischen 1 Minute und 1 Jahr gewählt werden, wobei Einschränkungen aus der Kommunikation resultieren können. Diese Angabe ist für die Bewertung des Arbeitspakets wichtig, weil sie zeigt, dass die Infrastruktur nicht nur auf eine starre Verbrauchsdatenerfassung ausgelegt wurde, sondern prinzipiell unterschiedliche zeitliche Auflösungen unterstützt. Damit schafft AP 2.7 die Voraussetzung dafür, dass die Daten sowohl für Monitoringzwecke als auch für weitergehende Regelungs- und Vernetzungsstrategien nutzbar gemacht werden können.

Es wurden zwei Varianten realisiert. Variante 1 betraf Gebäude, in denen sich Stromzähler und weitere Medien im Keller befinden. Vorgesehen waren hier der Austausch von Strom- und Gaszählern nach Bedarf in Kooperation mit den Energieversorgern, das Auslesen der Stromzähler über deren optische Schnittstellen, das Auslesen der Gaszähler über optische beziehungsweise Impulsschnittstellen, der Einbau von Wärmemengenzwischenzählern im Keller sowie die Anbindung der Strom-, Wärme- und Gaszähler über MBus-Draht, MBus-Wireless oder RS-232 an den Gebäudehub. Der Gebäudehub selbst wird im Keller installiert und über ein Kabelmodem an den COAX-Kabelnetz-Anschluss der STG angebunden.

Variante 2 betraf Gebäude mit Stromzählern auf den Etagen. Hier war vorgesehen, die Stromzähler nach Bedarf in Kooperation mit dem Energieversorger auszutauschen und sie über LoRa-Schnittstellen anzubinden. Auch wenn diese Variante deutlich knapper beschrieben wird, ist sie für die Gesamtlogik des Arbeitspakets wesentlich, weil sie zeigt, dass die Kommunikationslösung nicht auf einen einzigen Installationstyp beschränkt wurde. Vielmehr wurde eine zweite, funkttechnisch geprägte Erfassungsstrategie vorgesehen, um auch dezentral angeordnete Zähler in die Infrastruktur einzubinden. Damit erhöht AP 2.7 die praktische Anschlussfähigkeit der Quartiersvernetzung an unterschiedliche Gebäudetypen und Installationszustände im Bestand.

In der Ergebnisbewertung wird eine klare, wenn auch bewusst zurückhaltende Schlussfolgerung gezogen: Durch die installierte Infrastruktur können die relevanten Daten für eine Quartiersvernetzung in den ausgewählten Gebäuden gemessen und zu einem Server übertragen werden, von dem aus die Daten abgerufen werden können. Es kann daraus abgeleitet werden, dass in diesem Arbeitspaket die Grundlage für eine Quartiersvernetzung geschaffen wurde.

AP 2.7 somit als infrastrukturelles Grundlagenarbeitspaket für die digitale Quartiersvernetzung einzuordnen. Das Arbeitspaket leistet erstens die Auswahl und Beschaffung geeigneter Smart-Meter-Technik, zweitens die Anpassung der Kommunikationsarchitektur an die heterogene Zählerstruktur des denkmalgeschützten Bestands und drittens die Schaffung einer Serveranbindung, über die die relevanten Daten gebäudeübergreifend bereitgestellt werden können.

AP 2.8 knüpft unmittelbar an die in AP 2.7 geschaffene Mess- und Kommunikationsinfrastruktur an. Während dort die Grundlagen für die gebäude- und quartiersbezogene Datenerfassung gelegt wurden, richtet sich der Fokus nun auf die Anpassung eines Smart-Home-Systems an den denkmalgeschützten Bestand und auf dessen Nutzung zur verbrauchsnahe Regelung und Eigenverbrauchsoptimierung. Ziel des Arbeitspakets war der Einbau und die Anpassung eines Smart-Home-Systems in ausgewählten Bestandsbauten. Als geplante Arbeitsschritte werden die Erfassung und Analyse des Nutzerverhaltens sowie die Optimierung des Energiebedarfs durch Implementierung gezielter Regelstrategien genannt. AP 2.8 ist damit als Bindeglied zwischen Monitoring, Nutzerinteraktion und automatisierter Betriebsführung zu verstehen.

Die Grundidee dieses Ansatzes „homee Energiemanagement“ wird in Abbildung 220 veranschaulicht. Es ist herauszustellen, dass das System nicht als allgemeine Smart-Home-Lösung beschrieben wird, sondern als ein auf die im Projekt entwickelten Technologien zugeschnittenes Energiemanagement, das insbesondere den Betrieb einer installierten PV-Anlage beziehungsweise

perspektivisch auch von PV-Dachsteinen unterstützen soll. Ziel ist die zeitliche Verschiebung von Lasten, um einen möglichst hohen Anteil der lokal erzeugten elektrischen Energie direkt in der jeweiligen Wohneinheit selbst zu verbrauchen. Abbildung 220 markiert damit den konzeptionellen Ausgangspunkt des Arbeitspakets.



Abbildung 220: Konzept - „homee Energiemanagement“

Es gibt drei technische Voraussetzungen, die für diese Form der Eigenverbrauchsoptimierung erfüllt sein müssen. Erstens muss das Smart-Home-System die aktuelle PV-Produktion kennen. Zweitens muss es die Leistung an der Hausleitung, also Einspeisung oder Netzbezug, erfassen, damit daraus der aktuelle Verbrauch der Wohneinheit berechnet werden kann. Drittens müssen die zu steuernden Geräte mit dem Smart-Home-System verbunden sein, entweder direkt über integrierte Funkstandards oder über nachgerüstete Zwischenstecker beziehungsweise Relaiskontakte. Diese Dreiteilung ist wichtig, weil AP 2.8 damit nicht nur eine Benutzeroberfläche beschreibt, sondern die informations- und regelungstechnischen Voraussetzungen eines intelligenten Lastmanagements systematisch herleitet.

Die praktische Umsetzung erfolgte über den homee Energiemanager, einen eigenständig arbeitenden Mikro-Computer, der aufgrund seiner Bauform auf einer Hutschiene im Verteilerschrank montiert werden kann. Dies wird in Abbildung 221 dokumentiert. Für die textliche Einbindung sollte hervorgehoben werden, dass mit Abbildung 221 nicht nur das Gerät selbst gezeigt wird, sondern die für den Einsatz im Bestand wesentliche Installationsform: Das System ist so ausgelegt, dass es in vorhandene Verteilerschränke integriert werden kann, ohne umfangreiche zusätzliche Infrastruktur zu erfordern.



Abbildung 221: Montage des homee Energiemanagers auf der Hutschiene

Die Einrichtung des homee Energiemanagers erfolgt softwareseitig über eine Smartphone-App für iOS und Android. Das Gerät öffnet zunächst ein eigenes WLAN, mit dem sich der Nutzer verbindet; im Setup werden anschließend unter anderem die WLAN-Zugangsdaten sowie die Zuordnung der Messpunkte für Produktion und Leistungsmesser festgelegt. Für die Erfassung der PV-Produktion bestehen dabei zwei Wege: Entweder werden die Werte direkt aus einem netzwerkfähigen Wechselrichter, etwa von Fronius oder SMA, übernommen, oder die Leistung wird über Amperezangen gemessen, die um die drei vom Wechselrichter kommenden Phasen gelegt werden und ihre Werte per Z-Wave übertragen. Die entsprechende Hardware ist in Abbildung 222 dargestellt. Diese Abbildung ist deshalb wichtig, weil sie die konkrete Nachrüstlösung im Schaltschrank sichtbar macht und damit den Brückenschlag zwischen bestehender Elektroinstallation und digitalem Energiemanagement dokumentiert.



Abbildung 222: Montierte 3-Phasenzange

Wenn ein Smart-Meter-Modul von SMA oder Fronius vorhanden ist, können die Werte über das Netzwerk ausgelesen werden. Ist dies nicht der Fall, kann auch dieser Messpunkt über eine Z-Wave-Amperezange nachgerüstet werden. Anschließend müssen die Geräte in der App den richtigen Messpunkten zugeordnet werden. Diese Zuordnung wird in Abbildung 223 gezeigt. Es ist hervorzuheben, dass Abbildung 223 den Schritt von der Hardwareerfassung zur logischen Systemkonfiguration markiert: Erst durch die Deklaration von Wechselrichtern als „Produktion“ und des Hausanschlusses als „Leistungsmesser“ erhält das System die notwendige semantische Grundlage für spätere Automationen.



Abbildung 223: „Homescreen“ der homee Energiemanager App

Es wird deutlich, dass der homee Energiemanager zwar eigenständig arbeiten kann, aber von vornherein für das Zusammenspiel mit dem modularen Smart-Home-System homee entwickelt wurde. Die Kopplung beider Systeme erfolgt in der App über den Pfad „Geräte“ → „neues Gerät hinzufügen“ → „Brain Cube“ → „homee Energiemanager“, sofern sich beide Geräte im gleichen lokalen Netzwerk befinden. Dieser Schritt ist in Abbildung 224 dokumentiert. Die Abbildung sollte im Text ausdrücklich als Nachweis dafür verwendet werden, dass der Energiemanager nicht als Insellösung konzipiert ist, sondern in das umfassendere homee-System mit dessen Bedienoberfläche und Geräteverwaltung eingebunden wird.



Abbildung 224: „Geräte hinzufügen Screen“ im homee Smart Home System

Nach erfolgreicher Kopplung erscheint in der Smartphone-App der Bereich „E-Manager“, in dem die Echtzeitdaten, die Verlaufsdaten und der Energiefluss visualisiert werden. Die dazugehörige Oberfläche zeigt Abbildung 225. Hier wird die aktuelle Produktion in Watt ebenso angezeigt wie der am Hausanschluss gemessene Wert. Ist der Wert negativ, wird Energie aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen und die Anzeige erscheint orange; ist der Wert positiv, liegt PV-Überschuss vor und die Werte werden grün dargestellt. Für die Schlussdarstellung ist dies wichtig, weil AP 2.8 die Smart-Home-Komponente nicht nur zur automatisierten Regelung, sondern ausdrücklich auch zur Transparenz von Energieflüssen gegenüber dem Nutzer einsetzt.

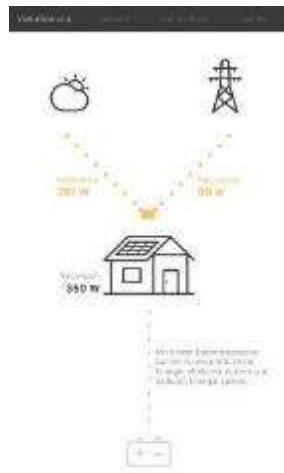


Abbildung 225: Echtzeitdaten der Visualisierung

Die zeitliche Auswertung der Energieflüsse wird über Abbildung 226 und Abbildung 227 weitergeführt. Dabei wird die in das öffentliche Netz eingespeiste Energie grün, die produzierte und von der Wohneinheit selbst verbrauchte Energie grau, zusätzlich aus dem Netz bezogene Energie orange und – soweit vorhanden – der Verlauf eines Batteriespeichers blau dargestellt.

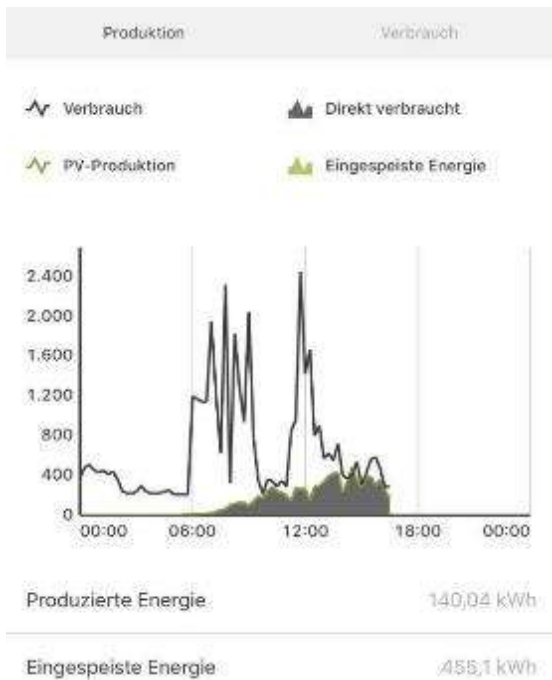


Abbildung 226: Verlaufsgrafik



Abbildung 227: Verlaufsgrafik „Verbrauch“

Die eigentliche regelungstechnische Bedeutung des Arbeitspakets wird im Abschnitt Energiemanagement beschrieben. Alle Werte zu Netzbezug, Einspeisung und Produktion stehen als sogenannte Trigger und zugleich als Bedingungen in den Automationen zur Verfügung. Dadurch können Regeln erstellt werden, die definierte Geräte bei PV-Überschuss automatisch einschalten. Als Beispiel ist die Regel zu nennen: „WENN Einspeisung > 50 Watt DANN Ladegerät Staubsaugerroboter einschalten.“ Die Bedienoberfläche hierzu wird in Abbildung 228 und Abbildung 229 dokumentiert. Für die textliche Einbindung sollte hervorgehoben werden, dass Abbildung 253 und Abbildung 254 die operative Ebene des Systems zeigen: Hier wird aus reiner Datenerfassung ein tatsächliches Regel- und Priorisierungsinstrument.



Abbildung 228: homee Energiemanager



Abbildung 229: Screen Energiemanager

Über diese Triggerlogik hinaus werden zusätzliche Funktionen des homee Energiemanagers beschrieben. Geräte können in ihrer Einschaltreihenfolge priorisiert werden, und es können Mindestlaufzeiten definiert werden. Als Beispiel wird eine Pumpe genannt, die mindestens zwei Stunden pro Tag laufen muss; erreicht das System diese Laufzeit nicht mit PV-Strom, wird die Pumpe zu einem definierten „spätestens“-Zeitpunkt aus dem öffentlichen Netz zugeschaltet. Gerade dieser Punkt ist für die Schlussfassung wichtig, weil er zeigt, dass AP 2.8 keine rein opportunistische Schaltung nach PV-Überschuss entwickelt, sondern ein regelbasiertes Energiemanagement mit Prioritäten und Mindestanforderungen. Das Smart-Home-System wird damit in Richtung eines echten Betriebsmanagements erweitert.

Als besonders relevantes Beispiel für die Kopplung von Smart-Home-Regelung und Gebäudetechnik nennt der Bericht den AC-Thor zur Warmwasseraufbereitung. Dabei handelt es sich um einen Heizstab, dessen Leistung über eine Netzwerkschnittstelle stufenlos geregelt werden kann. Der Bedienung des Energiemanagers hebt hervor, dass der AC-Thor dadurch exakt auf die Höhe des aktuellen PV-Überschusses eingestellt werden kann. Es wird deutlich, dass Smart-Home-System wird nicht nur für Komfort- oder Kleinlasten verwendet, sondern gezielt zur lastangepassten Einbindung thermischer Verbraucher.

Gleichzeitig enthält AP 2.8 eine für den Schlussbericht wesentliche kritische Einordnung. Die Forschungspartner stellen ausdrücklich fest, dass die im Rahmen des Forschungsprojekts von der beauftragten Firma erbrachten Leistungen nicht zufriedenstellend waren. Die Arbeiten sind teilweise erst nach vielfacher Aufforderung durchgeführt worden; insbesondere die Durchführung im Bereich des Monitorings habe die Projektpartner nicht überzeugt. Aus diesem Grund erhielt die Firma keine Beauftragung für die zu sanierenden Gebäude.

AP 2.9 schließt inhaltlich an die in AP 2.8 behandelten Smart-Home-Komponenten an und erweitert diese um die Ebene der energieeffizienten Beleuchtung. Ziel des Arbeitspakets war die Optimierung des Stromverbrauchs durch Auswahl eines Beleuchtungssystems, das für den denkmalgeschützten Bestand geeignet ist. Als geplante Arbeitsschritte werden die Auswahl eines komfortoptimierten Beleuchtungssystems für denkmalgeschützte Bauten, die Kompatibilität des Beleuchtungssystems zum ausgewählten Smart-Home-System sowie die Bewertung des Zielkonflikts zwischen Minimierung des Strombedarfs und komfortoptimiertem Nutzen benannt. AP 2.9 ist damit nicht als isolierte Leuchtmittelprüfung zu verstehen, sondern als Schnittstelle zwischen Energieeffizienz, Nutzerkomfort und digitaler Gebäudeintegration.

Gemeinsam mit den in AP 2.8 betrachteten Smart-Home-Systemen wurden energieeffiziente LED-Systeme beschafft, die auch im denkmalgeschützten Bestand eingesetzt werden können.

Neben der Energieeffizienz wurde ausdrücklich auch eine Steigerung von Komfort und Wohlbefinden als Ziel verfolgt. Deshalb wurden in der Bauform ausschließlich Retrofit-Lampen berücksichtigt. Diese Entscheidung ist für die Schlussfassung wichtig, weil sie den denkmalpflegerischen Bezug des Arbeitspakets klar macht: Die Beleuchtungslösungen sollten ohne neue Verkabelung und ohne tiefgreifende Eingriffe in den Bestand installierbar sein. Zusätzlich wurden medizinisch und komfortbezogen hohe Anforderungen formuliert: Die Lampen sollten nahezu flimmerfrei sein und in ihrer Farbtemperatur dem natürlichen Sonnenlicht möglichst nahekommen. Darüber hinaus wurde untersucht, ob eine tages- und helligkeitsabhängige Farbtemperaturführung – mittags helles Licht mit höherem Blauanteil, nachts geringe Helligkeit mit stärkerem Rotanteil – technisch und wirtschaftlich realisierbar ist und von den Nutzern angenommen werden könnte.

Auf Basis einer anfänglichen Marktrecherche wurden sieben intelligente Beleuchtungssysteme beschafft. Es werden zwei Funktionsgruppen unterschieden. Die erste Gruppe nutzt konventionelle LED-Leuchtmittel, deren Ansteuerung über das Smart-Home-System mittels Aktoren erfolgt. Diese Aktoren übernehmen je nach System Schalt- und Dimmfunktionen; zusätzliche Intelligenz liegt jedoch nicht im Leuchtmittel selbst. Eine Änderung der Farbtemperatur ist bei den im Projekt beschafften Testsystemen dieser Gruppe im Allgemeinen nicht erreichbar. Der ersten Gruppe werden die Systeme digitalSTROM, Delta Dore, Fibaro sowie die Produktlinie HomeMatic von eQ-3 zugeordnet. Die zweite Gruppe integriert demgegenüber sämtliche Elektronik unmittelbar in das Leuchtmittel. Dadurch sind neben dem Dimmen auch weitergehende Einstellmöglichkeiten wie die Änderung der Farbtemperatur möglich. Als Beispielsysteme werden Trådfri von Ikea sowie zwei Leuchten von TP-Link genannt; TP-Link verzichtet dabei im Unterschied zu Ikea auf ein zusätzliches Gateway, da das Leuchtmittel selbst ein WLAN-Netz bereitstellt. Beide Gruppen sind ohne neu zu verlegende Kabel installierbar und damit grundsätzlich für den denkmalgeschützten Bestand geeignet. Gleichzeitig unterscheiden sie sich deutlich im Bedienkonzept: Während Gruppe 1 stärker an vorhandene Schalterstrukturen anknüpft, ist Gruppe 2 mehr auf mobile Endgeräte oder Fernbedienungen ausgerichtet.

Für die praktische Einordnung ist diese Unterscheidung besonders relevant. Es ist hervorzuheben, dass bei den Systemen der ersten Gruppe die Steuerung weiterhin über vorhandene Lichtschalter möglich bleibt; Fibaro bietet darüber hinaus zusätzliche funkbasierte Schalter für eine direkte Kommunikation zur Leuchte. Bei den meisten Systemen dieser Gruppe werden die Aktoren in vorhandene Unterputzdosen eingebaut, während digitalSTROM mit sehr kompakten „Klemmen“ arbeitet. Die Systeme der zweiten Gruppe erfordern demgegenüber im Wesentlichen nur den Austausch der Leuchtmittel, sind aber in ihrer Bedienung stärker von mobilen Geräten oder Fernbedienungen abhängig. AP 2.9 bewertet damit nicht nur die Lichtquelle selbst, sondern auch die Frage, welche Interaktionsform im historischen Wohnungsbestand technisch und nutzerseitig plausibel ist.

Ein erster wesentlicher Untersuchungsschwerpunkt lag auf der Lichtqualität. Die Ergebnisse werden in Abbildung 230 und Abbildung 231. Hierfür wurden der einfache Ra, der erweiterte Farbwiedergabeindex Re, die Color Quality Scale (CQS) sowie der Gamut Area Index (GAI) erfasst. Als Referenz dienten vier LED-Leuchten sowie eine Glühlampe, darunter ein Leuchtmittel aus der Ikea Trådfri-Serie, zwei Lampen von TP-Link (LB120 und LB130) sowie eine dimmbare LED-Leuchte von Philips. Es kann festgestellt werden, dass alle vermessenen Lampen Farbwiedergabeindizes größer 80 erreichen und damit ein gutes Farbspektrum aufweisen. Gleichzeitig wird über Abbildung 231 deutlich, dass die bei etwa 2700 K eingestellte warme Lichtfarbe den GAI reduziert; auffällig ist hier insbesondere die LB130, die aufgrund ihrer RGB-LEDs besonders hohe Ergebnisse erzielt, die unter Umständen als übersättigt wahrgenommen werden können. Für die

Schlussfassung sollte daher hervorgehoben werden, dass Abbildung 230 und Abbildung 231 den Zielkonflikt zwischen guter Farbwiedergabe, Farbtemperatur und natürlicher Lichtanmutung sichtbar machen.

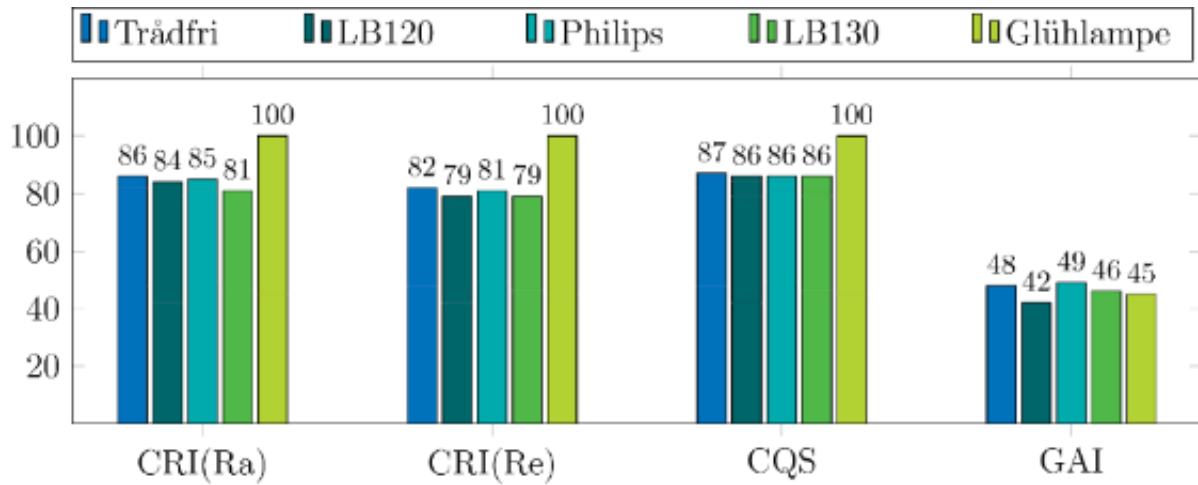


Abbildung 230: Farbindexes ausgewählter Leuchtmittel

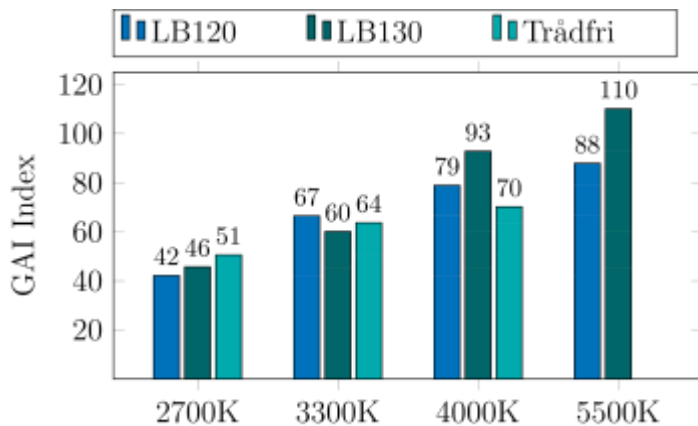


Abbildung 231: Gamut Area Index ausgewählter Leuchtmittel

Ein zweiter Schwerpunkt galt den Flimmereigenschaften der Leuchten. Diese werden in Abbildung 232 zusammengefasst. Es wird dabei zwischen Flimmerfrequenzen unter 200 Hz und über 200 Hz unterschieden und definiert den Flimmeranteil als maximalen Helligkeitsunterschied dividiert durch die Summe aus minimaler und maximaler Helligkeit. Dabei wird auch erläutert, dass eine Puls-Weiten-Modulation einen Flimmeranteil von 1 erreicht. Die Messergebnisse zeigen, dass die Systeme digitalSTROM, Delta Dore, HomeMatic und Fibaro dieselbe Philips-Lampe nutzen und die jeweiligen Unterputzaktoren deren Eigenschaften nicht deutlich verschlechtern. Weiterhin wird festgestellt, dass höhere Flimmeranteile von über 30 % nur bei hohen Frequenzen auftreten und damit für den Menschen unbedenklich sind, während potenziell wahrnehmbares Flimmern nur mit niedrigem Flimmeranteil auftritt und als nicht wahrnehmbar eingestuft wird.

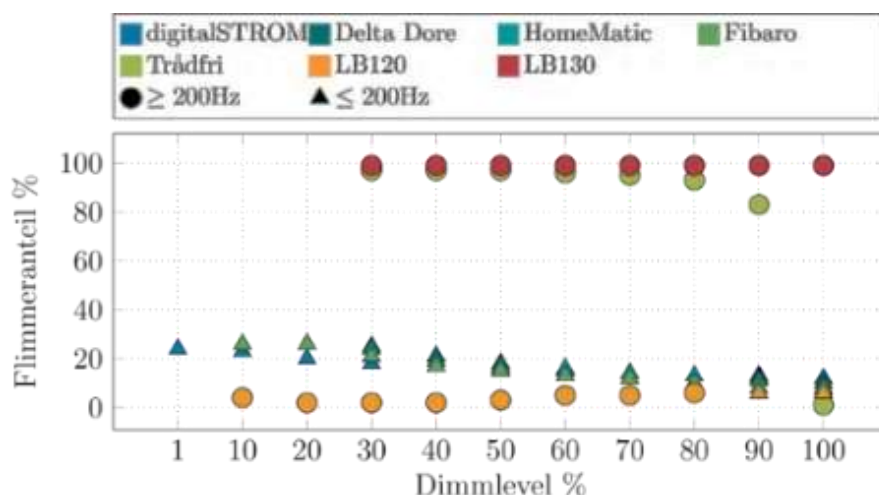


Abbildung 232: Flimmeranteil einzelner Leuchten

Die energetische Bewertung der Systeme wurde nicht auf den aktiven Betrieb der Leuchtmittel beschränkt, sondern ausdrücklich auf die Standby-Leistungsaufnahme der vernetzten Infrastruktur ausgeweitet. Hierzu wurden von jedem System Leistungsmessungen im aktiven und im Standby-Betrieb durchgeführt. Anschließend wurde mit Hilfe der gewonnenen Messdaten eine virtuelle 100-m²-Wohnung modelliert, deren Ausstattung in Tabelle 45 zusammengefasst ist. Die angenommene installierte elektrische Leistung der Beleuchtung beträgt dabei 280 W. Aus Tabelle 45 wird deutlich, dass das Modell mehrere Räume mit unterschiedlich ausgestatteten Leuchten und Aktoren umfasst, darunter Wohnzimmer, drei Schlafzimmer, Küche, Bad, WC, Flur und Vorratsraum. Für die Schlussdarstellung ist wichtig, dass der Energievergleich damit nicht auf Einzelgeräteebene stehenbleibt, sondern auf ein plausibles wohnungsbezogenes Nutzungsszenario übertragen wird.

Tabelle 45: Beleuchtungskomponenten in Modellrechnung

Zimmer	Beleuchtung	Leistung	Aktoren
Wohnzimmer	Deckenleuchte	40 W	Dimmaktor
	Esstischlampe	20 W	Dimmaktor
	Tischlampe	10 W	Dimmaktor
3 × Schlafzimmer	Deckenleuchte	20 W	Dimmaktor
	Nachtischlampe	5 W	Dimmaktor
	Schreibtischlampe	5 W	Dimmaktor
Küche	Deckenleuchte	30 W	Dimmaktor
	Unterbauleuchte	10 W	Dimmaktor
Bad	Deckenleuchte	20 W	Schaltaktor
	Spiegelschrank	10 W	Schaltaktor
WC	Deckenleuchte	20 W	Schaltaktor
Flur	Deckenleuchte	20 W	Schaltaktor
Vorratsraum	Deckenleuchte	10 W	Schaltaktor

Die Standby-Ergebnisse werden in Abbildung 233 dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Standby-Leistungsaufnahme je nach System deutlich unterscheidet. So verbraucht das HomeMatic-System mehr als doppelt so viel Energie wie das WLAN-basierte TP-Link-System, das ohne zusätzliches Gateway arbeitet; ein zentraler Verbraucher im HomeMatic-System ist dabei der Dimmaktor mit einer Leistungsaufnahme von größer 1 W im Standby. Das System von digitalSTROM weist zwar die niedrigste Energieaufnahme der Aktoren auf, dafür jedoch die größte Leistungsaufnahme in der Infrastruktur, wobei ausdrücklich angemerkt wird, dass digitalSTROM weit über ein reines Beleuchtungssystem hinausgeht.

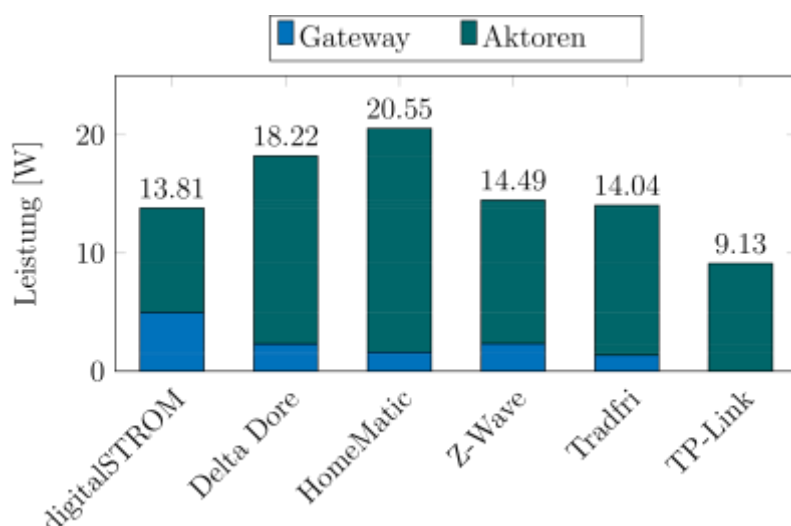


Abbildung 233: Leistungsaufnahme im Standby

Die zusammenfassende Systembewertung erfolgt in Abbildung 234. Auf Grundlage einer angenommenen aktiven Nutzungsdauer von zwei Stunden je Lampe zeigt sich, dass der Gesamtenergieverbrauch durch die Vernetzung je nach System um 40 % bis 90 % erhöht wird. Mit zunehmender Nutzungsdauer sinkt zwar der relative Anteil der Vernetzungsenergie; selbst bei einer fünfstündigen Nutzung beträgt er für das digitalSTROM-System noch etwa 20 % und erhöht den Gesamtverbrauch damit immer noch um 25 %. Dieses Ergebnis ist für AP 2.9 zentral, weil es den eigentlichen Zielkonflikt des Arbeitspakets sichtbar macht: Komfort- und Steuerungsfunktionen intelligenter Beleuchtungssysteme sind grundsätzlich realisierbar, gehen jedoch mit einem zusätzlichen Infrastrukturenergieverbrauch einher, der die reinen Effizienzvorteile moderner LED-Technik teilweise kompensieren kann.

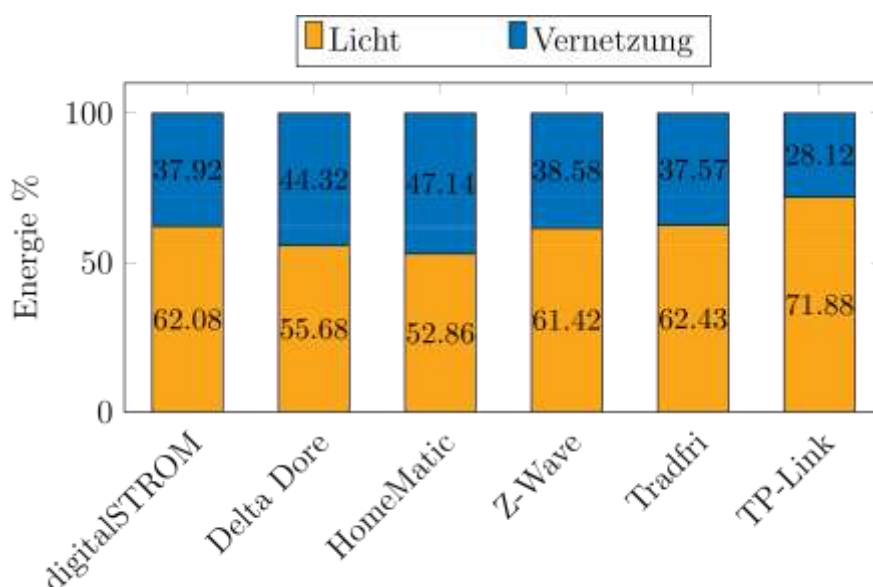


Abbildung 234: Energieverbrauch aufgeteilt nach Vernetzung und Lichterzeugung

AP 2.9 ist somit als komfort- und energiebezogenes Ergänzungsarbeitspaket innerhalb von Teilprojekt 2 einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass eine große Zahl intelligenter Beleuchtungssysteme am Markt verfügbar ist, die ohne Neuverkabelung auch im denkmalgeschützten Bestand eingesetzt werden können. Zweitens wird mit Abbildung 230, Abbildung 231 und Abbildung 232 belegt, dass die untersuchten Systeme gute Farbwiedergabewerte erreichen und kein

wahrnehmbares Flimmern aufweisen. Drittens zeigen Tabelle 45, Abbildung 233 und Abbildung 234, dass der Energiebedarf intelligenter Beleuchtungssysteme wesentlich durch ihre Infrastruktur mitbestimmt wird. Der zentrale Erkenntnisgewinn von AP 2.9 besteht damit darin, dass die Auswahl energieeffizienter LED-Technologie im denkmalgeschützten Bestand nicht allein anhand der Lampeneffizienz erfolgen darf, sondern immer gemeinsam mit Fragen der Bedienbarkeit, Farbanpassung, Flimmerfreiheit, Smart-Home-Kompatibilität und Infrastrukturenergie zu bewerten ist

II.6.3 Teilprojekt 3 – Intelligente Quartiersvernetzung und Energieflussoptimierung

Nach Abschluss der in den vorangegangenen Teilprojekten bearbeiteten Grundlagen, Untersuchungen und Umsetzungsbausteine widmet sich Teilprojekt 3 der weiterführenden fachlichen Vertiefung sowie der systematischen Zusammenführung der im Projekt entwickelten Erkenntnisse und Lösungsansätze. Im Mittelpunkt stehen dabei die im Rahmen von AP 3.1 bearbeiteten Fragestellungen, die eine wesentliche Grundlage für die nachfolgenden Arbeitsschritte innerhalb des Teilprojekts bilden. Die in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse sind daher nicht isoliert zu betrachten, sondern in ihrem funktionalen Zusammenhang mit den weiteren Arbeiten in Teilprojekt 3 zu bewerten.

AP 3.1 bildet den methodischen Auftakt von Teilprojekt 3 und knüpft unmittelbar an die in den Teilprojekten 1 und 2 erarbeiteten Gebäude-, Technologie- und Systemgrundlagen an. Während dort vor allem die Sanierung einzelner Gebäude, die Entwicklung geeigneter LowEx-Komponenten sowie deren bauphysikalische und anlagentechnische Eignung im Vordergrund standen, richtet sich der Fokus nun auf die Quartiersebene. Ziel dieses Arbeitspakets war die Charakterisierung der Energieflüsse des Wohnquartiers. AP 3.1 übernimmt damit die Funktion, den energetischen Ist-Zustand der Margarethenhöhe abzubilden. In AP 3.2 wurden mögliche Versorgungsoptionen durch KWK-Systeme untersucht und in AP 3.3 wurde die netzseitige Anbindung über Umspannstationen und Stromleitungen beschrieben, während in AP 3.4 alle Informationen in einer konsistenten Modellstruktur zusammengeführt wurden. Anschließend wurden in AP 3.5 Regelungskonzepte untersucht und in AP 3.6 die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen. Abschließend wurden in AP 3.7 Ergebnisse zusammengefasst und Empfehlungen abgeleitet. Im Folgenden sind die Ergebnisse dieser Arbeiten dargestellt.

II.6.3.1.1 Bestandsanalyse des Quartiers

II.6.3.1.1.1 Wohngebäudebestand

Das betrachtete Quartier Margarethenhöhe ist ein Wohnquartier, das überwiegend aus Einfamilienhäusern (EFH) und Zweifamilienhäusern (ZFH) besteht, wie in Abbildung 235 dargestellt. Mehrfamilienhäuser (MFH) machen ca. 20 % des Gebäudebestandes aus, wobei es sich auch um eher kleine Gebäude mit nicht mehr als zehn Wohnungen handelt. Über die Hälfte der MFH haben nur drei oder vier Wohneinheiten. Einen kleinen Anteil an den Gebäuden haben auch Gebäude, die gemischt genutzt werden und Gebäude des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD).

Im Rahmen der energetischen Charakterisierung des Wohngebäudebestands der Margarethenhöhe werden Daten aus verschiedenen Quellen gesammelt und zusammengeführt. Stehen keine direkten Informationen zur Verfügung, werden die benötigten Daten über Korrelationen erzeugt. Aus dem „Katalog zur denkmalgerechten Bewirtschaftung“ können die Bauphasen nach dem erbauenden Architekten Georg Metzendorf den Gebäuden zugeordnet werden [3]. Dabei wird angenommen, dass Gebäude, die wiederaufgebaut bzw. später errichtet wurden, in den Stilen der entsprechenden Bauphase gebaut wurden.

Die Erstellung der Wohngebäudetypologie erfolgt auf Basis des Baualters, des Gebäudetyps und der Anbausituation. Dabei wird die Unterteilung in Baualtersklassen in Anlehnung an die Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt vorgenommen [4]. Innerhalb der Baualtersklassen erfolgt eine Unterteilung in Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser, wobei unter Einfamilien-

häuser Gebäude mit einer oder zwei Wohn- bzw. Gewerbeeinheiten zusammengefasst werden. Diese Unterkategorie wird nochmals durch die Anbausituation in freistehend, einseitig angebaut und beidseitig angebaut unterschieden. Wie in Tabelle 46 dargestellt, sind die beiden Kategorien, in die sich die meisten Gebäude einordnen lassen, die einseitig und beidseitig angebauten EFH, die vor 1918 errichtet wurden.

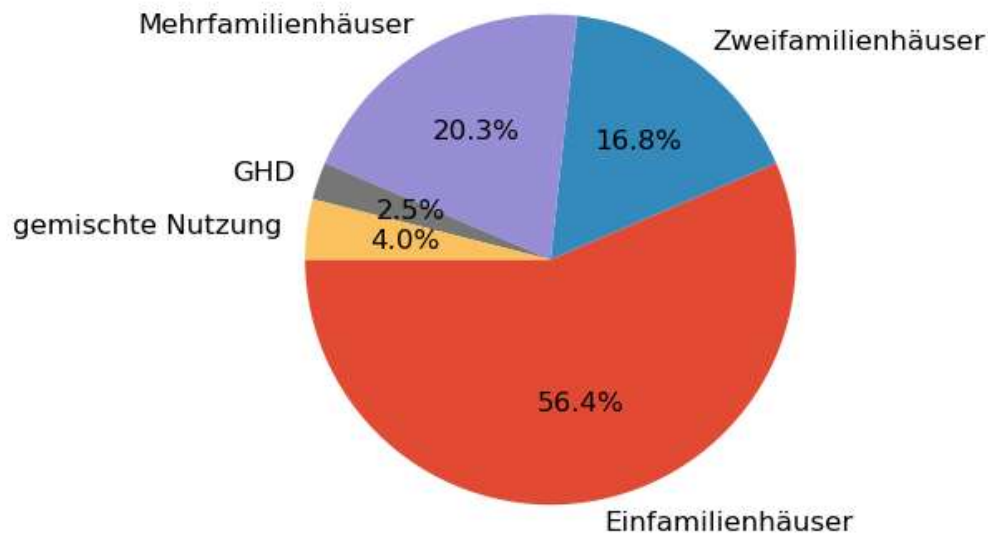


Abbildung 235: Gebäudestruktur des Quartiers Margarethenhöhe.

Der Energiebedarf der Gebäude wird unterteilt in Strom, Heizwärme- und Warmwasserbedarf berechnet. Für den Heizwärmebedarf wird gemäß der Gebäudetypologie von TABULA für jede Gebäudeklasse ein spezifischer Heizwärmebedarf angenommen (siehe Tabelle 46). Dafür werden die Angaben zu den Heizwärmebedarfen aus dem Webtool, bezogen auf die Klimaregion Essen, die als Bezugsfläche die Nettogrundflächen haben [5], mithilfe der Angaben zu den Heizwärmebedarfen bezogen auf die beheizte Wohnfläche aus [4] umgerechnet:

$$NGF \cdot HWB_{NGF} = BWF \cdot HWB_{BWF}$$

Dabei bezeichnet NGF die Nettogrundfläche, HWB_{NGF} den Heizwärmebedarf pro Quadratmeter bezogen auf die Nettogrundfläche und entsprechend BWF die beheizte Wohnfläche und HWB_{BWF} den Heizwärmebedarf pro Quadratmeter bezogen auf die beheizte Wohnfläche. Zur Differenzierung der Gebäudetypologie der Margarethenhöhe in freistehende, einseitig angebaute und beidseitig angebaute Gebäude werden zunächst für die beiden betrachteten Baualtersklassen Mittelwerte aus den Kennwerten für Einfamilienhäuser und Reihenhäuser gebildet. Diese Mittelwerte dienen als näherungsweise Abschätzung für den Heizwärmebedarf einseitig angebaute Einfamilienhäuser.

Für Mehrfamilienhäuser wird hinsichtlich der Anbausituation dieselbe prozentuale Abweichung des spezifischen Heizwärmebedarfs angesetzt, wie sie für Einfamilienhäuser der entsprechenden Baualtersklasse ermittelt wurde. Auf dieser Grundlage sowie unter Einbeziehung der jeweils vorliegenden Kennwerte für Mehrfamilienhäuser in den beiden Baualtersklassen werden die fehlenden Heizwärmebedarfswerte für Mehrfamilienhäuser rechnerisch abgeleitet.

Tabelle 46: spezifischer Heizwärmebedarf für die verwendeten Gebäudeklassen und Anzahl der Gebäude in den Klassen.

Baualtersklasse	Haustyp	Anbausituation	Heizwärmebedarf [kWh/(a m² BWF)]	Anzahl Gebäude
1860 - 1918	EFH	Freistehend	167	13
		Einseitig angebaut	154	246
		Beidseitig angebaut	141	172
	MFH	Freistehend	154	18
		Einseitig angebaut	142	50
		Beidseitig angebaut	129	28
1919 - 1948	EFH	Freistehend	148	3
		Einseitig angebaut	134	12
		Beidseitig angebaut	120	4
	MFH	Freistehend	150	7
		Einseitig angebaut	136	27
		Beidseitig angebaut	121	11

Für den Warmwasserbedarf werden nach TABULA für Einfamilienhäuser $10 \frac{kWh}{m^2 a}$ angenommen und für Mehrfamilienhäuser $15 \frac{kWh}{m^2 a}$. Der Strombedarf wird über die Anzahl der Personen je Wohnung abgeschätzt (s. Tabelle 47). Für die Annahme, wie viele Personen in einer Wohnung leben, wird der Standard-Quadratmeterwert von 35 m² Wohnfläche pro Person verwendet [6].

Tabelle 47: Strombedarf nach Personenanzahl je Haushalt nach [7].

Anzahl Personen im Haushalt	Strombedarf $[\frac{kWh}{a}]$
1	2.300
2	3.000
3	3.600
4	4.000
5	5.000
6	5.700

Zur Darstellung der Ergebnisse wird mithilfe von Open Street Maps ein Layer erstellt, der alle Geometrien der betrachteten Gebäude enthält. Über eine eindeutige ID können allen Gebäuden alle relevanten Daten zugeordnet werden und als Attributtabelle hinterlegt werden.

Zur zeitlich aufgelösten Betrachtung der Energieflüsse werden Lastprofile erzeugt. Dafür wird eine Clusterung der Gebäude vorgenommen. Für jedes Cluster wird jeweils ein Lastprofil für

Wärme, Strom und Warmwasser definiert. Ziel ist eine möglichst hohe Ähnlichkeit der Gebäude innerhalb eines Clusters bei gleichzeitig begrenzter Clusteranzahl. Zuerst wird zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden unterschieden. Die Clusterung der Nichtwohngebäude erfolgt über die verwendeten Lastprofile und ist in Tabelle 48 zu finden. Die Wohngebäude werden in Ein- und Mehrfamilienhäuser differenziert, da unterschiedliche Lastcharakteristika zu erwarten sind. Innerhalb dieser Kategorien erfolgt die weitere Einteilung anhand des Heizwärmebedarfs mittels der Funktion „natürliche Unterbrechungen“ (Jenks-Algorithmus) in QGIS, welche die Varianz innerhalb der Cluster minimiert und zwischen den Clustern maximiert [8]. Es werden jeweils fünf Cluster für Ein- und Mehrfamilienhäuser gebildet. Die Clusterzugehörigkeit korreliert erwartungsgemäß mit der Gebäudegröße, da sich die energetischen Kennwerte der Typologie nur geringfügig unterscheiden und die Wohnfläche maßgeblich ist. Da auch Strom- und Warmwasserbedarfe primär von der Wohnfläche abhängen, erfolgt die Clusterbildung ausschließlich auf Basis eines Kriteriums.

Die Stromlastprofile für die EFH-Cluster werden aus den Lastprofilen, die die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin zur Verfügung stellt [9], ausgewählt, sodass sie einen ungefähr passenden Jahresstrombedarf haben. Die Lastprofile werden von einer einminütigen Auflösung in eine fünfminütige Auflösung umgerechnet. Für die Stromlastprofile der MFH-Cluster und für die Heizwärme- und Warmwasserlastprofile werden die Referenzlastprofile aus der VDI-Richtlinie 4655 verwendet [10]. Die benötigten Wetterdaten werden den Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes entnommen [11] und die Verteilung der Werk- und Sonntage wird passend zu den Stromlastprofilen an dem Jahr 2010 ausgerichtet. Die Stromlastprofile werden in fünfzehnminütiger Auflösung verwendet, während die Heizwärme- und Warmwasserprofile eine stündliche Auflösung haben.

II.6.3.1.1.2 Nichtwohngebäudebestand

Durch Internetrecherchen und eine Quartiersbegehung wird die Nutzungsart, der nicht für das Wohnen genutzten Einheiten, bestimmt. Auf Grundlage der ermittelten Nutzungsarten kann der Energiebedarf angenommen werden. Für die Bestimmung des Heizwärme- und Strombedarfes wird die VDI-Richtlinie 3807 „Verbrauchskennwerte für Gebäude“ genutzt [12]. Für den Warmwasserbedarf wird auf die DIN V 18599-10 zurückgegriffen [13]. Die Objekte werden den in der VDI und der DIN-Norm vorhandenen Gebäudegruppen zugeordnet. Dabei ist für die meisten Nutzungsarten eine eindeutige Zuordnung möglich. Für die insgesamt knapp 40 GHD-Gebäude werden sieben Cluster gefunden, in denen sich die Nutzungszeiten- und -arten ähneln und somit auch der Strom- und Wärmebedarf, wie in Tabelle 48 aufgeführt.

In der VDI-Richtlinie werden die energetischen Kennwerte bezogen auf die beheizte Bruttogrundfläche BGF_E angegeben, die sich durch die Multiplikation der Gebäudegrundfläche mit der Anzahl der beheizten Geschosse ergibt, wenn angenommen wird, dass nicht beheizte Flächen innerhalb des Gebäudes vernachlässigt werden können. Für die Gebäude mit gemischter Nutzung wird ein Verhältnisfaktor VF bestimmt, um die Heizwärme- und Strombedarfe der GHD-Einheiten anteilig zu berechnen:

$$VF = \frac{A_{ges}}{BGF_E} \quad (1)$$

Für die reinen Nichtwohngebäude ist nur die Bruttogrundfläche bekannt, weswegen der Verhältnisfaktor aus der VDI-Richtlinie entnommen wird. Für Gebäudearten, die nicht in der Richtlinie vorhanden sind, wird ein durchschnittlicher Verhältnisfaktor von 0,6 angenommen.

Tabelle 48: GHD-Typologie.

Cluster GHD	Enthaltene Gebäude	Beispiele	Anzahl Gebäude
11	Nutzung gewöhnlich werktags von 8-18 Uhr, kein Einzelhandel	Schulen, Büro, Arzt	9
12	Stärkere Nutzung in den Abendstunden	Sportstätten, Musikschule	5
13	Einzelhandel	Bäckerei, Eiscafé	7
14	Dienstleistungen	Diakonie, Sparkasse	8
15	Wäscherei	Wäscherei	1
16	Begegnungsstätten	Kirche, Gemeinschaftszentrum	6
17	Haushaltsähnliche Betriebe	Hotel, Seniorenwohnanlage	2

In Tabelle 49 ist der angenommene gesamte Energiebedarf für die Wohn- und GHD- Einheiten aufgeführt. Mit einem Anteil von mehr als 70 % dominiert der Wohnungssektor den Gesamtenergiebedarf.

Tabelle 49: Energiebedarf des Quartiers aufgeteilt in Wohngebäude und GHD-Einheiten.

Energiebedarf in MWh/a	Wohngebäude	GHD
Heizen	10.598	3.578
Warmwasser	1.022	892
Haushaltsstrom	3.445	999

Für die zeitliche Auflösung der Energiebedarfe werden für die GHD-Einheiten, wie oben erwähnt, Standardlastprofile (SLP) verwendet. Die Wärme-SLP haben eine stündliche Auflösung, während die Strom-SLP eine fünfzehnminütige zeitliche Auflösung besitzen. In Tabelle 50 ist die Zuordnung der gebildeten Cluster zu den Profiltypen aufgeführt.

Tabelle 50: Zuordnung der GHD-Cluster zu den Standardlastprofilen Strom und Wärme.

Cluster GHD	SLP Strom	SLP Gas
11	G1	GKO
12	G2	GBD
13	G4	GHA
14	G4	GBD
15	G4	GWA
16	G6	GGA
17	H0	GBH

II.6.3.1.1.3 Ist-Zustand Energieversorgungssysteme im Quartier

Informationen zu den Energieversorgungssystemen der einzelnen Wohnungen wurden zu großen Teilen von der Margarethe Krupp Stiftung zur Verfügung gestellt und in die erstellte Datenstruktur eingepflegt. Die Wohnungen werden größtenteils mit Gasheizungen beheizt, in ca. 10 % der Wohnungen sind noch Nachtspeicherheizungen verbaut.

II.6.3.1.2 Erstellung des Quartiermodells

Zur Modellierung des Quartiers wird die TransiEnt- [14] und die IntegraNet-Bibliothek [15] als Grundlage verwendet und vorhandene Modelle modifiziert oder eigene, kompatible Modelle erstellt. Im September 2021 wurde die IntegraNet-Bibliothek in die TraniEnt-Bibliothek integriert, diese neue Version wird im Rahmen von EnQM-Phase2 verwendet. Das Quartiersmodell wird mithilfe des *GridConstructors* aufgebaut. Das Modell wurde im Rahmen des Projektes IntegraNet entwickelt und ermöglicht den flexiblen Modellaufbau großer Quartiere [15]. Ein *GridConstructor* bildet jeweils einen unverzweigten Leitungsabschnitt eines Verteilnetzes ab. Er besteht aus einer frei definierbaren Anzahl n von *GridElements*, die jeweils ein Gebäude in der oberen Reihe sowie optional ein gegenüberliegendes Gebäude in der unteren Reihe enthalten. Jedes Gebäude ist an die jeweilige Hauptleitung (Strom-, Gas- oder Wärmenetz) angeschlossen und setzt sich aus zwei zentralen Modellbestandteilen zusammen: einem Lastprofilmodell zur Übergabe der Strom- Heizwärme- und Warmwasserbedarfen sowie einem Technologiemoell zur Abbildung der im Gebäude installierten Anlagen. Die Standorte der Umspannstationen im Quartier werden im Rahmen einer Ortsbegehung identifiziert, da in OpenStreetMap für diesen Bereich keine entsprechenden Eintragungen vorhanden waren. Ausgehend von diesen Standorten wird das Stromverteilnetz entlang der Straßenverläufe aufgebaut. Daraus ergeben sich sechs Teilbereiche, die jeweils durch eine Umspannstation versorgt werden. Die Dymola-Grafikebene des Modells ist in Abbildung 236 dargestellt.

Für die Parametrisierung können im Parameterfenster unter anderem folgende Parameter definiert werden: Anzahl der Netzelemente, Vorhandensein eines gegenüberliegenden Gebäudes, eingesetzte Technologien je Gebäude, Leitungslängen zwischen den Gebäuden sowie verwendete Dateien für die Lastprofile und Startspalten. Die händische Parametrisierung über das Modelica-Dialogfenster ist bei großen Quartiersmodellen mit mehreren hundert Gebäuden nicht praktikabel. Daher wird ein ID-basiertes Parametrisierungskonzept implementiert. Jedem Gebäude wird eine eindeutige ID zugewiesen. Alle gebäudespezifischen Parameter werden in einer zentralen Matrix hinterlegt. Eine Suchfunktion identifiziert anhand der ID die zugehörige Zeile der Matrix, über die anschließend alle relevanten Parameter ausgelesen werden.

Die möglichen Technologien je Gebäude sind im *Systems*-Modell vorhanden und werden über die Parametrisierung aktiviert und deaktiviert. Die zeitaufgelösten Strom-, Heizwärme-, und Warmwasserbedarfe werden an die aktiven Technologiemodelle übergeben, welche die zur Bedarfsdeckung erforderlichen Leistungen simulieren und an die jeweiligen Verteilnetze weitergeben. Im Folgenden werden alle verwendeten Modelle kurz charakterisiert.

Der Gaskessel wird über eine vereinfachte energetische Bilanz mit einem angenommenen Jahresnutzungsgrad von 0,9 modelliert [16]. Die Nachtspeicherheizungen werden auf Basis standardisierter Lastprofile des Verteilnetzbetreibers modelliert [17]. Das Profil ist Außentemperaturabhängig und wird so angepasst, dass oberhalb einer Heizgrenztemperatur von 15 °C kein Heizbetrieb erfolgt. Das normierte Lastprofil wird mittels Skalierungsfaktor an den gebäudespezifischen Heizwärmebedarf angepasst. Für die Nachtspeicherheizungen wird ein Jahresnutzungsgrad von 0,98 angenommen [16]. Das erstellte Wärmepumpensystemmodell beinhaltet ein Wärmepumpenmodell, bei dem mithilfe des COPs der Strombezug berechnet wird, ein Zusatzheizgerät und einen thermischen Speicher, der auf 35 °C geregelt wird, da für Fußbodenheizungen niedrige Vorlauftemperaturen ausreichen. Der COP wird mit 4,9 angenommen. Für das Trinkwarmwasser wird eine Frischwasserstation modelliert, die eine zusätzliche Temperaturerhöhung für das Trinkwarmwasser abbildet.

Aufgrund des Denkmalschutzes werden Solardachziegel zur Stromerzeugung eingesetzt. Das erstellte Modell berücksichtigt bis zu drei unterschiedlich ausgerichtete Dachflächen (Süd, West, Ost), deren Erträge addiert werden. Dachflächen, Neigungen und Ausrichtungen werden mittels GIS-Daten räumlich den Gebäuden zugeordnet [18]. Zur Reduktion der Rechenzeit des Quartiersmodells wird die Stromerzeugung durch die Solardachsteine in einem separaten Modell gebäudescharf simuliert und die sich ergebenden Zeitreihen als Input der Gesamtsimulation übergeben. Das Batterie-Speichermodell der TransiEnt wurde angepasst, sodass es schneller simuliert. Bei PV-Überschuss wird der Speicher geladen und entlädt, wenn der Strombedarf höher ist als die PV-Produktion. Für die Entladungstiefe werden 90 % angenommen und für die Be- und Entladewirkungsgrade 95 %.

Zur Reduktion des Rechenaufwands werden einzelne Untermodelle vereinfacht, beispielsweise werden detaillierte Gasleitungsmodelle ersetzt, sodass die erdgasbasierte Wärmebereitstellung nur bilanziell betrachtet wird. Diese Vereinfachung wird umgesetzt, da im Quartier keine Einspeisung erneuerbarer Gase vorgesehen ist und im Bestandsnetz von ausreichend dimensionierten Leitungen ausgegangen werden kann.

Zur realitätsnahen Abbildung der gemischt genutzten Gebäude wird das Modell *GridElement* so erweitert, dass je Gebäude zwei separate Lastprofile eingelesen werden können. Dadurch wird die getrennte Berücksichtigung von Wohneinheiten und GHD-Einheiten ermöglicht. Die Lastprofile werden über die Clusternummern zugeordnet und durch Additionsblöcke summiert. Über einen Skalierungsfaktor werden die Clusterprofile an die tatsächlich gebäudespezifischen Jahresbedarfe angepasst. Die Lastprofile werden zeitlich um eine normalverteilte Verzögerungszeit mit einer Standardabweichung von 2.400 s gegeneinander verschoben.

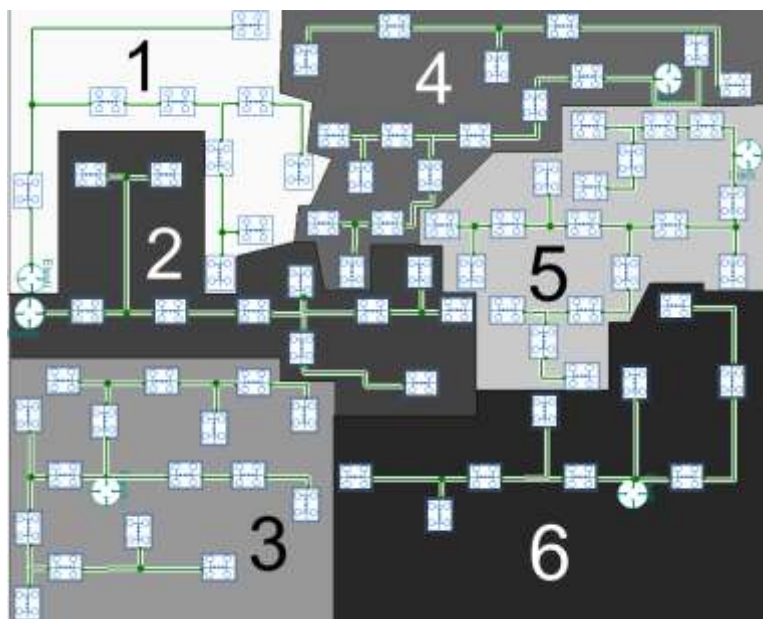


Abbildung 236: Oberste Modellebene des Quartiermodells der Margarethenhöhe.

II.6.3.1.3 Erstellung und Auswertung der Szenarien

Zur Analyse der Auswirkungen von verschiedenen energetischen Sanierungsmaßnahmen werden mehrere Szenarien betrachtet, die schrittweise aufeinander aufbauen. Die Stützjahre sind 2030 und 2050. Zuerst wird der Ist-Zustand betrachtet. Anschließend wird die Dämmung der Gebäudehülle berücksichtigt. Darauf aufbauend wird im nächsten Szenario der Ausbau von Photovoltaik in Form der Solardachsteine mit einbezogen. Anschließend wird dieses Szenario um Batteriespeicher erweitert. Im letzten Szenario werden in geeigneten Gebäuden Wärmepumpen eingesetzt. Im Folgenden werden die Szenarien und die Ergebnisse der Simulationen vorgestellt.

II.6.3.1.3.1 Ist-Zustand

Für den Ist-Zustand wird das Modell mit den Analyseergebnissen aus Kapitel II.6.3.1.1 parametrisiert. Kein Gebäude ist demnach energetisch saniert und die Bereitstellung des Wärmebedarfs erfolgt über Gaskessel und Nachtspeicherheizungen. In Abbildung 237 ist der zeitlich aufgelöste Leistungsbezug des Quartiers dargestellt, wobei bei der elektrischen Leistung zwischen der benötigten Leistung für die Nachtspeicherheizungen und dem Leistungsbezug der sonstigen elektrischen Geräte unterschieden wird. Der Gasverbrauch weist eine starke saisonale Abhängigkeit auf und erreicht in den Wintermonaten Spitzenleistungen von über 5 MW, während er im Sommer deutlich geringer ausfällt und auf dem Niveau des Haushaltsstroms liegt. Der Haushaltsstrom verläuft im Vergleich dazu konstant über das Jahr, während die Nachtspeicherheizungen vor allem in der Heizperiode deutliche nächtliche Lastspitzen verursachen. Somit ist zu erwarten, dass die Reduktion des Heizwärmebedarfs durch Dämmmaßnahmen und der Ersatz ineffizienter Heizsysteme ein großes Potenzial für CO₂-Einsparungen bieten. In Abbildung 238 ist zusätzlich der zeitliche Verlauf der Wärme- und Strombedarfe des Quartiers, getrennt nach Wohnnutzung und GHD-Einheiten, dargestellt. Der Bedarf der Wohneinheiten macht ungefähr drei Viertel des Gesamtbedarfs aus. Daher kann bereits eine energetische Sanierung dieses Gebäudebestands einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Gesamtenergiebedarfs leisten.

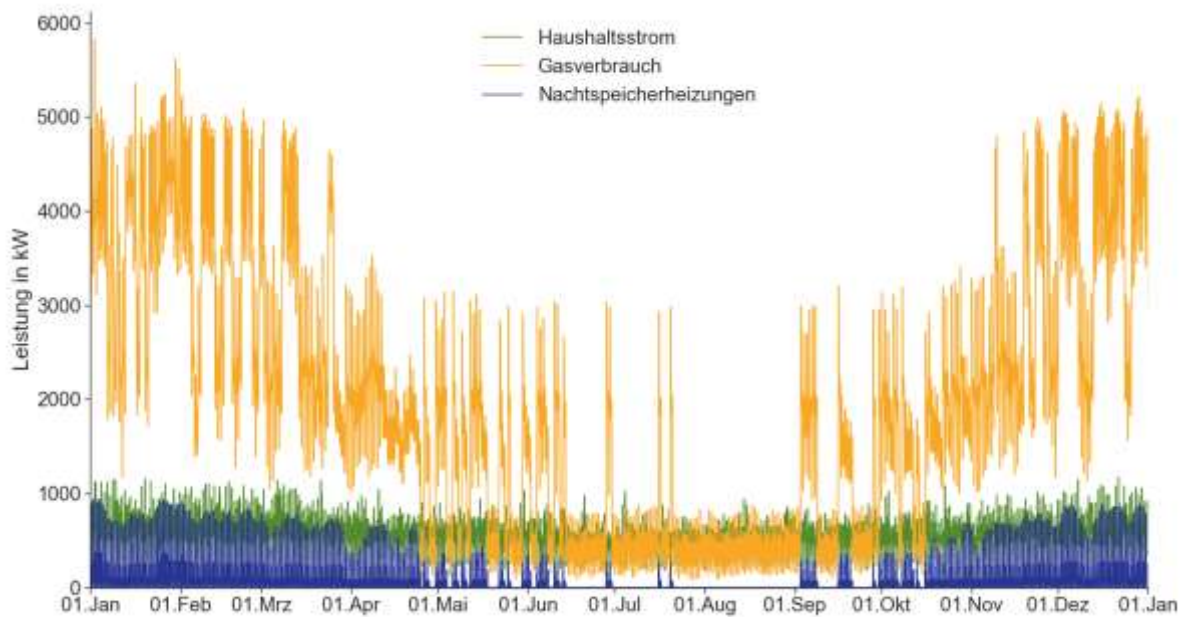


Abbildung 237: Jahresverlauf der bezogenen Leistung im Quartier für die Gaskessel, die Nachtspeicherheizungen und den sonstigen Haushaltsstrom für den Ist-Zustand.

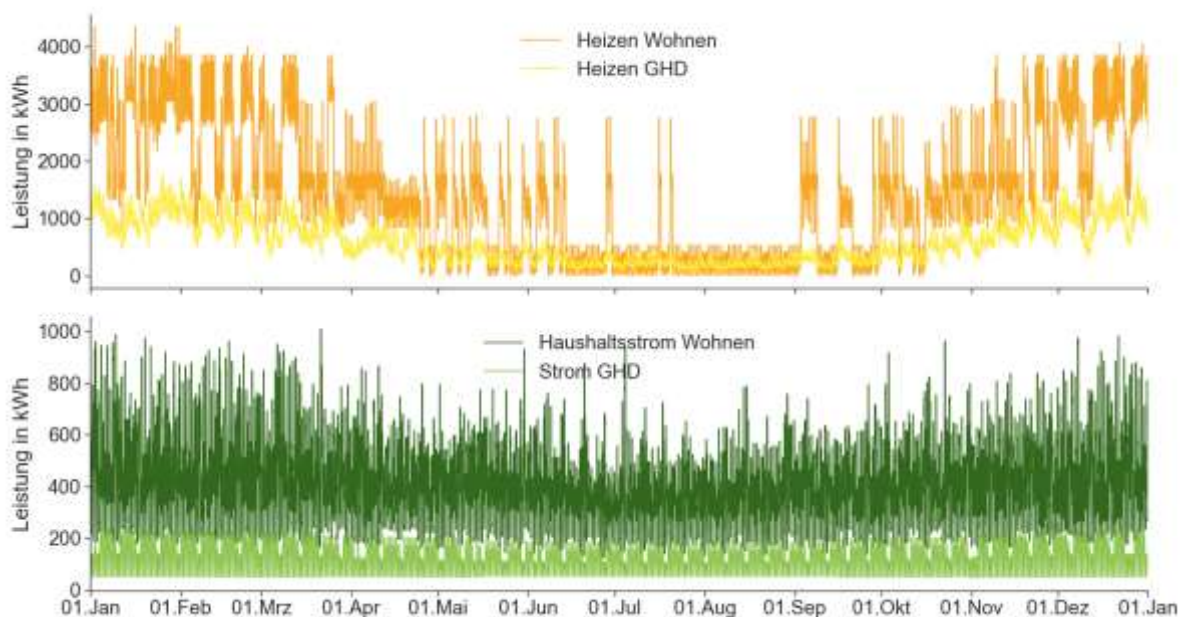


Abbildung 238: Jahresverlauf der bezogenen Leistung für das Heizen (oben) und den Strom aller anderen elektrischen Verbraucher (unten) im Quartier im Ist-Zustand aufgeteilt nach Wohnen und GHD.

II.6.3.1.3.2 Szenario Gebäudesanierung

Für das Szenario „Gebäudesanierung“ wird die Reduzierung des Heizwärmebedarfes durch die energetische Sanierung der Gebäudehülle betrachtet. Gaskessel werden nicht ausgetauscht, Nachtspeicherheizungen werden bei Sanierung durch Gaskessel ersetzt. Die Renovierung einer Wohnung bei einem Mieterwechsel wird als günstigster Zeitpunkt für die energetische Sanierung identifiziert. Darauf aufbauend wird eine konstante Sanierungsrate angenommen, die sich an der Anzahl der Wohnungen orientiert, die laut der Margarethe Krupp-Stiftung jährlich bei einem Mieterwechsel renoviert werden. Diese Annahmen führen zu einer Sanierungsrate von ca. 30 Woh-

nungen pro Jahr. In den betrachteten Zeiträumen von 2022 bis 2030 und 2030 bis 2050 werden so 240 bzw. 600 Wohnungen saniert. Der Anteil der sanierten Wohnungen liegt demnach im Jahr 2030 bei ca. 21 % und im Jahr 2050 bei ca. 73 %.

Zur Erstellung der Szenarien werden die zu sanierenden Wohnungen zufällig ohne Gewichtung ausgewählt, da keine Faktoren bekannt sind, die zu einer Gewichtung führen können. Das Gebäudealter ist beispielsweise homogen. In Abbildung 239 ist dargestellt, welche Gebäude im betrachteten Szenarium bis zum Stützjahr 2030 bzw. 2050 saniert werden. Dabei ist zu erkennen, dass bis 2030 viele Gebäude erst teilweise saniert wurden. 2050 sind schon 60 % der Gebäude komplett saniert und zusätzlich fast 25 % teilsaniert.



Abbildung 239: Verteilung der sanierten, teilsanierten und unsanierten Gebäude für das Stützjahr 2030 (links) und 2050 (rechts); Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).

Zur Bestimmung des Heizwärmebedarfes nach der energetischen Sanierung wird das weniger ambitionierte Modernisierungspaket 1 von TABULA als Orientierung verwendet, da aufgrund des Denkmalschutzes die möglichen Maßnahmen stärker begrenzt sind. Es wird eine Verringerung des Heizwärmebedarfes von 35 % als unterer Wert der Modernisierungspakete 1 für die verwendeten Gebäudetypen angenommen [4].

Die Berechnung der Heizwärmebedarfe der Gebäude für die Jahre 2030 und 2050 erfolgt in Abhängigkeit der Anzahl der sanierten Wohnungen und der Wohnungen mit Nachtspeicherheizungen in den Gebäuden. Der gesamte Heizwärmebedarf eines Wohngebäudes setzt sich aus dem Heizwärmebedarf HWB_{NSH} der Wohnungen mit Nachtspeicherheizungen und dem Heizwärmebedarf HWB_{Gas} der Wohnungen, die mit Gas beheizt werden, zusammen:

$$HWB_{ges,sz} = HWB_{Gas,sz} + HWB_{NSH,sz} \quad (2)$$

Dabei wird vernachlässigt, dass sich der Heizwärmebedarf nicht gleichmäßig auf alle Wohnungen in einem Gebäude aufteilt, was sich insgesamt betrachtet herausmittelt. Der Heizwärmebedarf der Wohnungen, die mit Nachtspeicherheizungen beheizt werden, wird mit Formel (3) berechnet, wobei HWB_{NSH} den Heizwärmebedarf bezeichnet, der vor den Sanierungen den Nachtspeicherheizungen zugeschrieben wurde und n_{NSH} bzw. $n_{NSH,san}$ die Anzahl der Wohnungen im Gebäude mit Nachtspeicherheizungen vor bzw. nach der Sanierung.

$$HWB_{NSH,sz} = \frac{HWB_{NSH}}{n_{NSH}} \cdot (n_{NSH} - n_{NSH,san}) \quad (3)$$

Für die Berechnung des Heizwärmebedarfes für die Jahre 2030 bzw. 2050 der Wohnungen, die mit Gas beheizt werden, wird Formel (4) verwendet.

$$HWB_{Gas,sz} = (HWB_{Gas} - HWB_{NSH,sz}) \cdot \left[\left(\frac{n_{W,Gas,unsan}}{n_W - n_{NSH,unsan}} \right) + (1 - 0,35) \cdot \left(\frac{n_{W,Gas,san} + n_{W,NSH,san}}{n_W - n_{NSH,unsan}} \right) \right] \quad (4)$$

Abbildung 240 zeigt den Energiebedarf für den Ist-Zustand sowie für die betrachteten Szenarien der Jahre 2030 und 2050, jeweils aufgeteilt nach Nutzungsarten. Dabei ist links der Energiebedarf der Wohngebäude und rechts der Gesamtenergiebedarf des Quartiers dargestellt. Der Gasbedarf und der Strombedarf für die Nachtspeicherheizungen reduzieren sich mit fortschreitender Sanierung. Der Effekt ist für die Nachtspeicherheizungen stärker ausgeprägt, weil sie bei der Sanierung durch Gaskessel ausgetauscht werden.

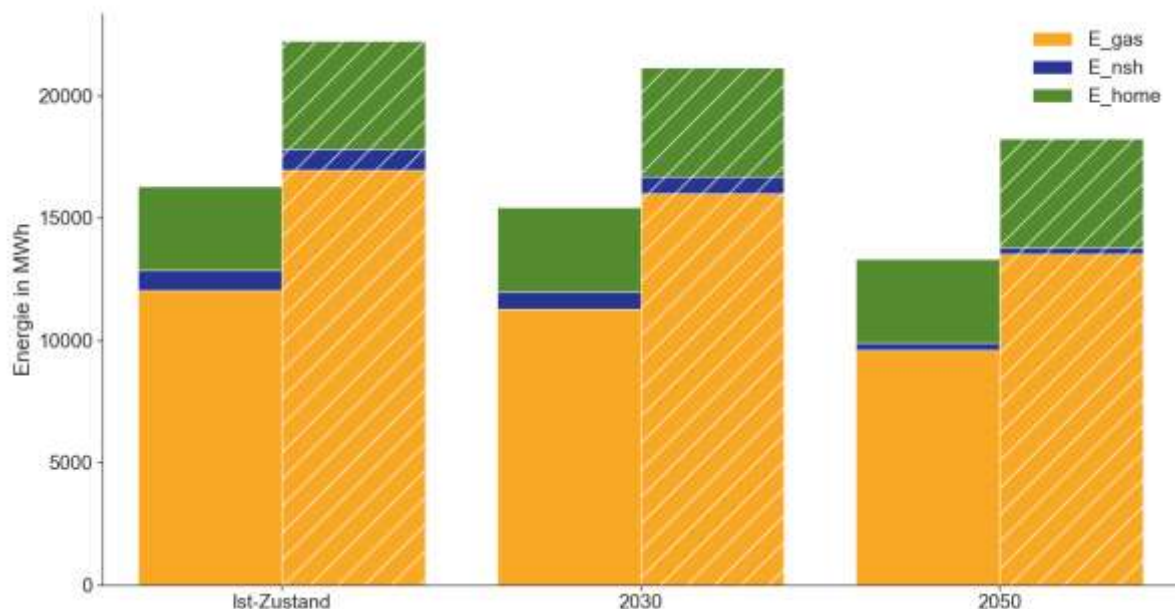


Abbildung 240: Jahresenergiebedarf des Quartiers für die betrachteten Jahre und aufgeteilt nach Energieträger und -nutzung. Links ist jeweils der Bedarf der Wohnbebauung und rechts des gesamten Quartiers abgebildet.

II.6.3.1.3.3 Szenario Photovoltaik

Für den Ausbau der Photovoltaik in der Siedlung wird ein maximaler Ausbaupfad betrachtet. Das heißt alle Gebäude, die laut tetraeder.solar eine gute oder sehr gute Eignung für Photovoltaik haben [19], werden bis 2050 mit den Solardachsteinen ausgestattet. Das entspricht einer jährlichen Quote von 2,77 % der Gebäude mit Wohnungen im Quartier. Bis 2030 werden so 131 Gebäude mit Photovoltaik ausgestattet, worunter sich alle der 100 sehr gut geeigneten Wohngebäude befinden. Die gut geeigneten Gebäude werden zufällig ausgewählt. Das Alter der Dächer steht nicht zur Verfügung und kann daher nicht mit einbezogen werden. Bis 2050 werden insgesamt 459 Gebäude mit den Solardachsteinen belegt. Im Szenarienjahr 2050 haben laut diesem maximalen Ausbauszenario ca. 78 % der Wohngebäude Solardachsteine.

Für die reinen GHD-Gebäude wird ebenfalls eine maximale Belegung der sehr gut und gut geeigneten Gebäude und ein gleichmäßiger Ausbau angenommen, wodurch in 2050 sieben GHD-Gebäude mit Photovoltaik ausgestattet sind. Die Kirche wird, aufgrund ihrer Höhe und der damit einhergehenden weiten Sichtbarkeit der Solardachsteine, ausgeschlossen. In Abbildung 241 ist der sich ergebende Ausbau der Photovoltaik bis 2050 dargestellt.



Abbildung 241: PV-Ausbauszenario für die Jahre 2030 und 2050; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).

In Abbildung 242 werden zuerst nur die Wohneinheiten berücksichtigt. Die Jahresdauerlinie der Residuallast der Wohneinheiten für den Ist-Zustand sowie für die Szenarien 2030 und 2050 ist dargestellt. Positive Werte kennzeichnen einen Strombezug aus dem Netz, während negative Werte eine Einspeisung überschüssiger Energie darstellen. Im Vergleich zum Ist-Zustand reduziert sich die Residuallast in den Szenarien 2030 und 2050 über weite Teile des Jahres. Im Szenario 2050 treten auch in mehreren Stunden negative Residuallasten auf. Diese können durch Speicheroptionen netzdienlich verschoben werden. Gleichzeitig bleibt jedoch in vielen Stunden weiterhin ein Strombezug aus dem Netz erforderlich.

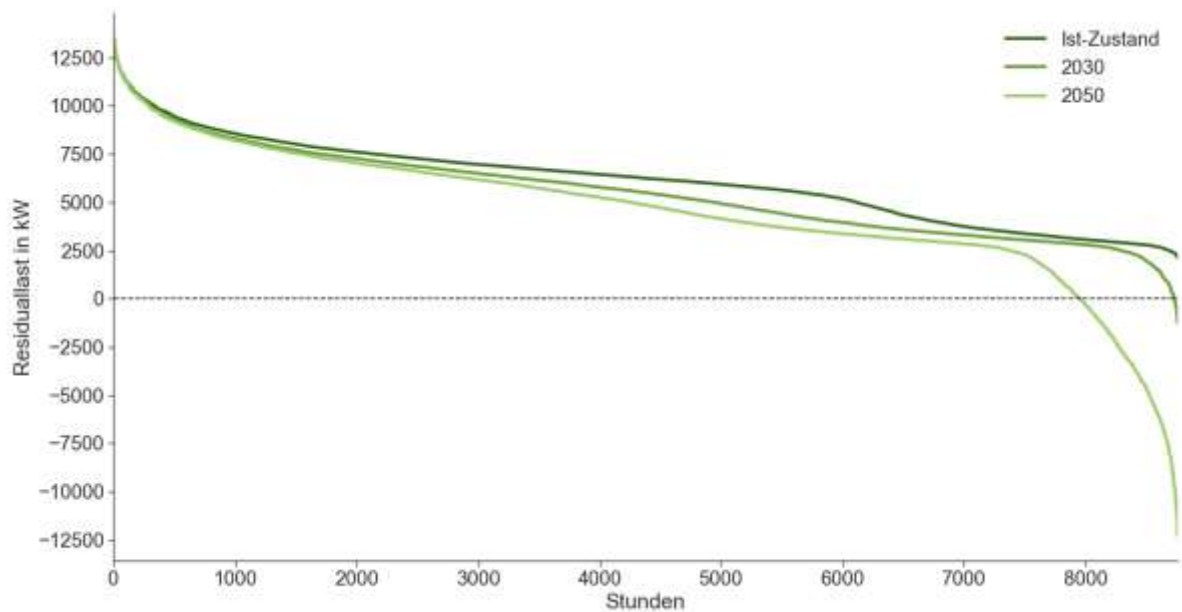


Abbildung 242: Residuallast des Wohnquartiers im Ist-Zustand und in den Stützjahren 2030 und 2050 mit Solardachsteinen.

In Abbildung 243 ist der Deckungs- und Selbstversorgungsgrad des gesamten Quartiers für die beiden Szenarijahren monatlich aufgelöst dargestellt. Während der Deckungsgrad den prozentualen Anteil der Stromerzeugung durch die Photovoltaikanlagen am Strombedarf des gesamten Quartiers angibt, gibt der Selbstversorgungsgrad an, wie groß der prozentuale Anteil des Strombedarfs ist, der durch den produzierten Photovoltaikstrom gedeckt werden kann. Daher werden beim Selbstversorgungsgrad generell niedrigere Werte als beim Deckungsgrad erreicht, wobei für das Szenarijahren 2030 keine großen Unterschiede ersichtlich sind, also der produzierte Strom überwiegend im Quartier selbst verbraucht wird. In den Sommermonaten können in diesem Szenarijahren schon um die 20 % des benötigten Stroms durch die Photovoltaikanlagen gedeckt werden. Im Szenarijahren 2050 werden beim Deckungsgrad in den Sommermonaten durchschnittlich um die 50 % erreicht und beim Selbstversorgungsgrad zwischen 30 und 40 %.

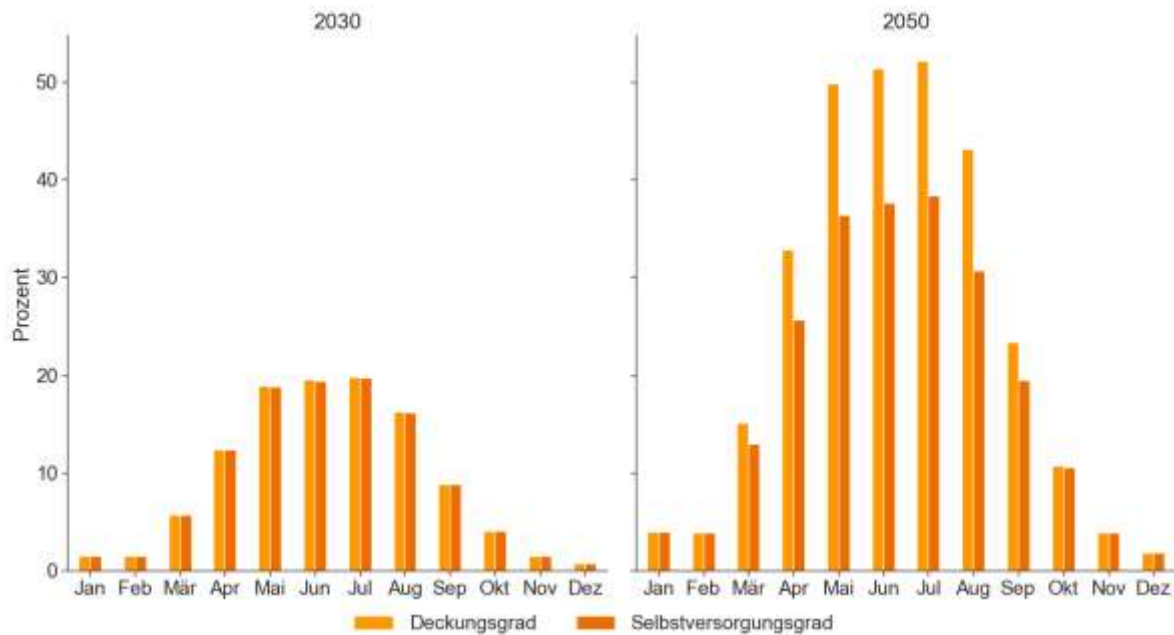


Abbildung 243: Vergleich Deckungsgrad und Selbstversorgungsgrad für die Szenarienjahre 2030 und 2050.

II.6.3.1.3.4 Szenario Batterien

Zusätzlich zum Ausbau der Solardachsteine im Quartier wird auch der ergänzende Ausbau mit Batteriespeichern betrachtet. Dabei erhält jedes Gebäude mit Solardachsteinen einen Speicher. Um eine passende Größe für die Speicher zu bestimmen, wird der Strombedarf und der Ertrag der Solardachsteine berücksichtigt. Orientierung für übliche Größen bietet das Speichermonitoring 2018 [20]. In dem Bericht wird das KfW-Förderprogramm für Solarstromspeicher wissenschaftlich evaluiert. Für 2017 wird ein Verhältnis von 1 von der nutzbaren Batteriekapazität von Lithium-Ionen-Speichersystemen zur PV-Nennleistung angegeben. Für das Verhältnis der nutzbaren Batteriekapazität zum jährlichen Stromverbrauch wird für 2017 1,3 angegeben. Von den beiden so errechneten Kapazitäten je Gebäude wird die geringere als Speichergröße ausgewählt und auf zweier kWh Schritte gerundet. Durch dieses Vorgehen werden für das Jahr 2050 420 Speicher mit einer nutzbaren Speicherkapazität von insgesamt 1.042 kWh in den Gebäuden angenommen. In Abbildung 244 sind die Kapazitäten der installierten Speicher bis 2050 dargestellt. Für das Szenarienjahr 2050 ist in Abbildung 245 zu sehen, wie viele Batterien mit welcher Größe angenommen werden. Die kleinsten und am häufigsten verwendeten Batterien haben 2 kWh. Die größeren Batterien mit 8 bis 12 kWh werden nur selten eingesetzt.

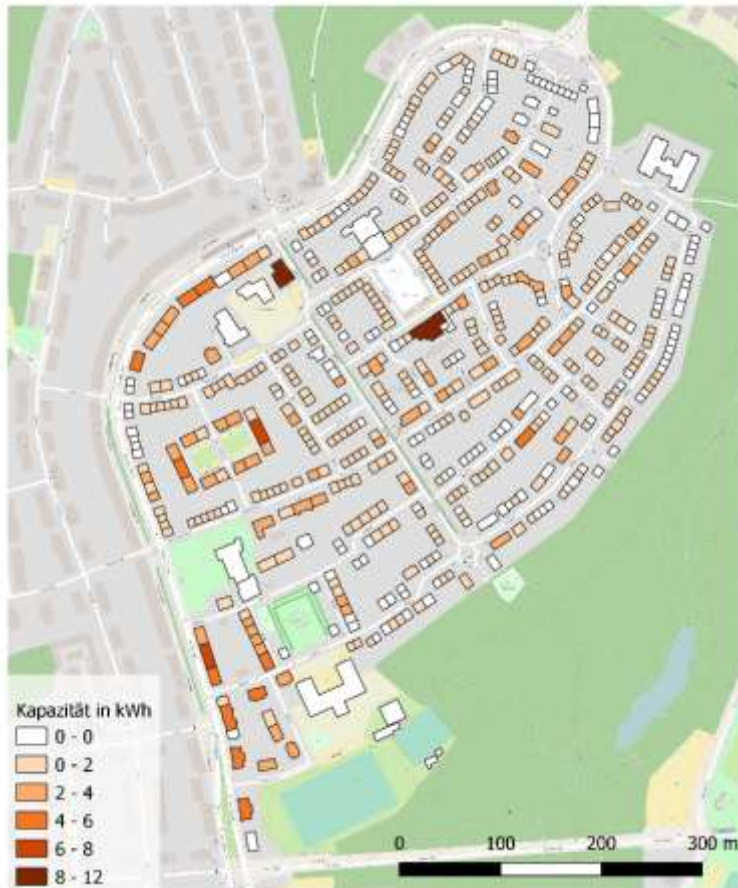


Abbildung 244: Kapazität der installierten Speicher in den Gebäuden bis zum Szenarijahren 2050; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).

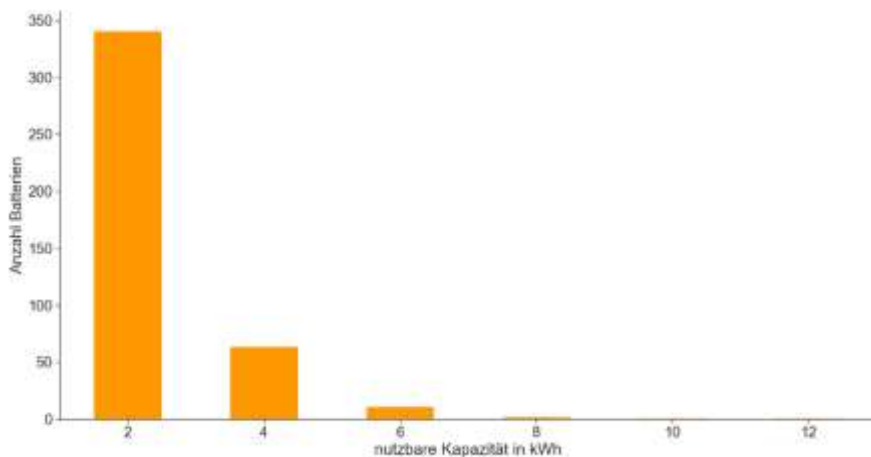


Abbildung 245: Anzahl der Batterien je nutzbarer Speicherkapazität im Szenariojahr 2050.

Die Abbildung 246 zeigt den monatlichen Selbstversorgungsgrad des Quartiers durch Photovoltaik für die Szenarijahren 2030 und 2050, jeweils mit und ohne Batteriespeicher. Im Jahr 2030 liegt der Selbstversorgungsgrad insgesamt noch auf einem niedrigen Niveau und erreicht in den Sommermonaten maximale Werte von rund 20 %, während er in den Wintermonaten nahezu vernachlässigbar ist. Bis 2050 steigt der Selbstversorgungsgrad deutlich an und erreicht in den Sommermonaten durch den kontinuierlichen PV- und Batterieausbau Werte von über 40 %. Hier kann man nun auch einen Nutzen der Batterien für die Wohngebäude im Gesamten erkennen,

da es auch auf dieser Ebene und nicht nur auf Einzelgebäudeebene zu einem PV-Strom Überschuss kommt.

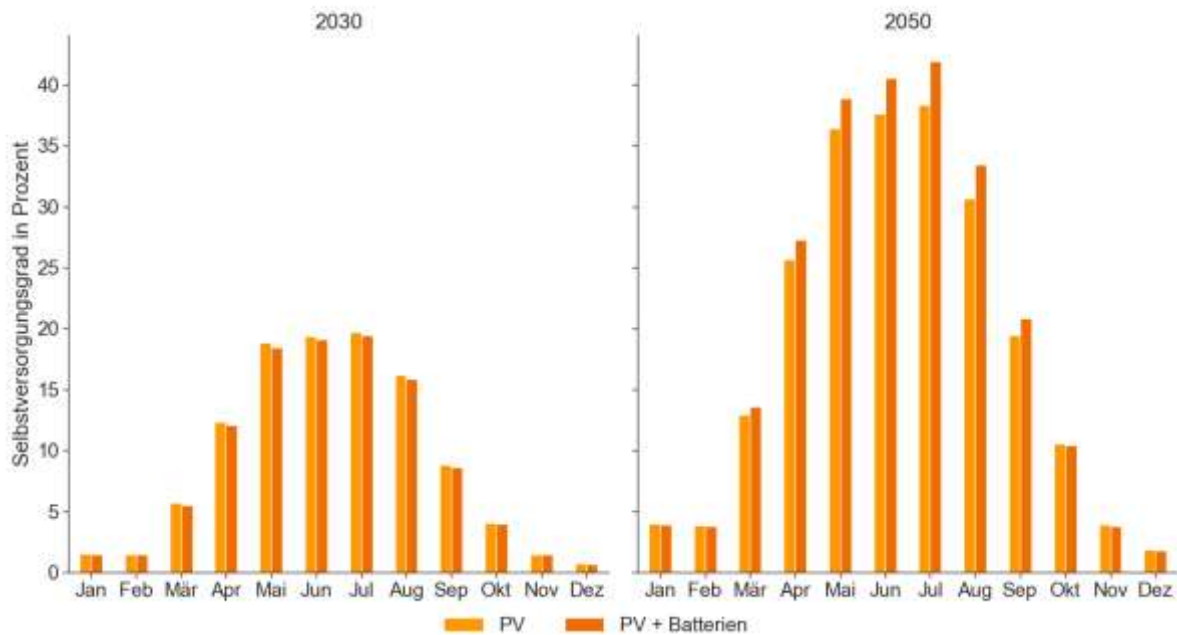


Abbildung 246: Vergleich des Selbstversorgungsgrades des Quartiers 2030 und 2050 mit Photovoltaikanlagen und mit Photovoltaikanlagen + Batterien.

Als Variante wird zusätzlich eine Simulation für das Stützjahr 2050 durchgeführt, bei der statt der Batterien in den Gebäuden eine zentrale Quartiersbatterie modelliert wird. In Abbildung 247 ist der durchschnittliche Ladezustand der Gebäudebatterien im Vergleich zu der Quartiersbatterie je Monat dargestellt. Die Gebäudebatterien weisen übers Jahr hinweg einen höheren durchschnittlichen Ladezustand auf als die Quartiersbatterie, was auf die Regelungsstrategie zurückzuführen ist. Die Gebäudebatterien laden bei PV-Strom Überschuss im Gebäude, auch wenn andere Gebäude im Quartier, die z. B. keine Solardachsteine haben, Bedarf hätten. Die Quartiersbatterie wird erst geladen, wenn im Quartier insgesamt ein PV-Strom Überschuss herrscht. Der Effekt ist in Abbildung 248 verdeutlicht, in der der durchschnittliche Ladezustand der Gebäudebatterien für die Stützjahre 2030 und 2050 und für die Quartiersbatterie 2050 für eine Winterwoche abgebildet ist. Die Gebäudebatterien speichern an manchen Tagen schon Strom ein, während die Quartiersbatterie nicht lädt.

In Kapitel 179 wird ein Regelungsansatz vorgestellt, der auch für die Gebäudebatterien das Quartier berücksichtigt.

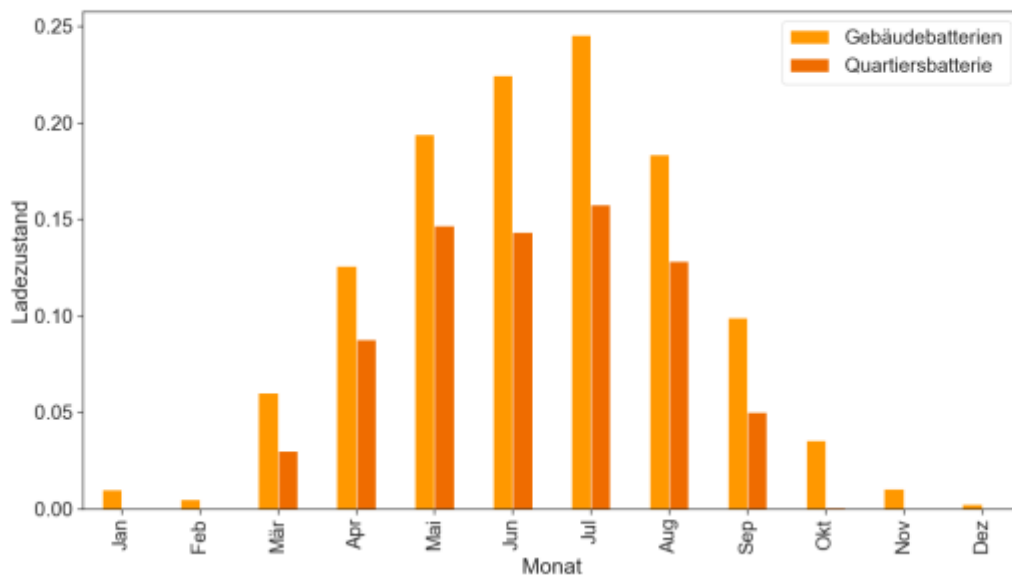


Abbildung 247: Vergleich des durchschnittlichen Ladezustands der Gebäudebatterien und der Quartiersbatterie 2050.

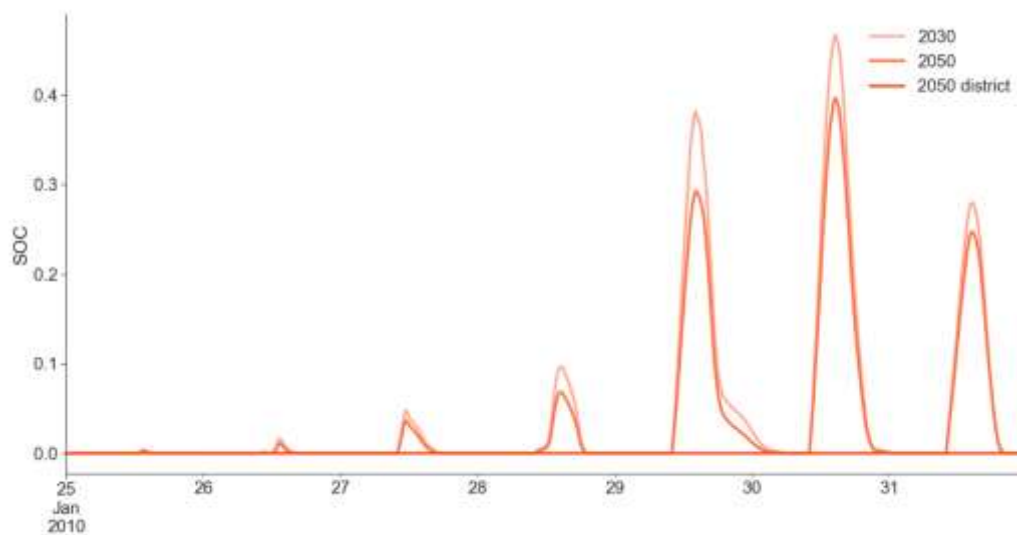


Abbildung 248: Ladezustand der Batterien im Quartier für eine Winterwoche für die Stützjahre 2030 und 2050 und die Quartiersbatterie in 2050.

In Abbildung 249 ist ein Vergleich der positiven Residuallast für unterschiedliche Szenarien dargestellt. Der Zubau von Photovoltaik führt zu einer Abnahme der positiven Residuallast. Für das Szenarienjahr 2050 zeigt auch der Batteriezubau eine Verringerung des Energiebezugs.

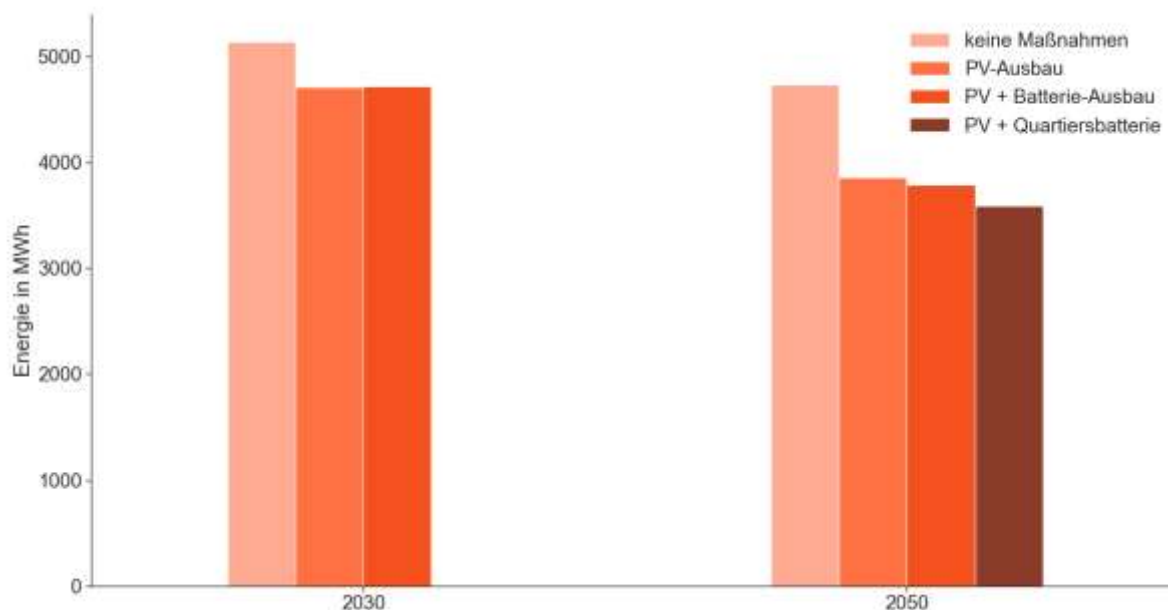


Abbildung 249: Jahresbilanz der positiven Residuallast.

II.6.3.1.3.5 Szenario Wärmepumpen

Zur Bestimmung der Eignung der Gebäude auf der Margarethenhöhe für den Einsatz von Wärmepumpen mit Erdsonden wird zuerst der gesamte jährliche Heizwärmebedarf jedes Gebäudes nach Sanierung ermittelt. Anschließend wird die benötigte Heizleistung überschlägig berechnet, indem der gesamte jährliche Heizwärmebedarf durch eine geschätzte Vollbenutzungsstundenzahl von 2.000 h geteilt wird [21]. Für die ermittelte benötigte Heizleistung wird eine Wärmepumpe mit einer passenden Heizleistung aus der Serie SW 302H3 von alpha innotec ausgewählt. Die Leistung der Geräte liegt zwischen 5 und 30 kW, Gebäude mit größeren Heizleistungen werden als nicht geeignet eingestuft. Der Wärmespeicher wird an die Auslegung bei den Demonstrationsobjekten angepasst. Eine 8 kW Wärmepumpe erhält somit einen 540 L Speicher und andere Leistungsklassen werden entsprechend skaliert. Die maximale Leistungsaufnahme der Wärmepumpe berechnet sich aus der Heizleistung der Wärmepumpe geteilt durch den COP, der mit 4,5 angenommen wird. Die Verdampfer-bzw. Kälteleistung ergibt sich aus der Differenz der Heizleistung und der maximalen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe. Die benötigte Sondenlänge kann durch die Division der Verdampferleistung durch die spezifische Entzugsleistung, die von der Beschaffenheit der Erde abhängig ist, berechnet werden. Für die spezifische Wärmeentzugsleistung des Bodens wird angelehnt an die DIN EN 15450 ein Mittelwert von mangelhaftem und normalen Untergrund von ca. 40 W/m bei 1.800 Betriebsstunden pro Jahr angenommen [22]. Die Zahl der benötigten Bohrungen wird durch die Limitierung der Sondenlänge auf 100 m aus Genehmigungsgründen bestimmt. Der ungefähre minimale Platzbedarf ergibt sich aus einer quadratischen Anordnung der Bohrungen im Abstand von 6 m und 3 m nach außen zur Grundstücksgrenze. Dieser wird mit den Gartenflächen verglichen, worüber die Eignung bestimmt wird. Zur Bestimmung der Gartenflächen werden die Grünflächen zwischen den Gebäuden ermittelt und durch die Anzahl der angrenzenden Gebäude geteilt und um einen Sicherheitsfaktor von 0,8 verringert, um anderweitige Flächennutzung zu berücksichtigen. Mit diesen Annahmen werden 535 der Ge-

bäude als potenziell geeignet für eine Wärmepumpe mit Erdsonden ermittelt. Im Wärmepumpenszenario werden aufbauend auf das Szenario mit Solardachsteinen für das Stützjahr 2050 Wärmepumpen in dafür geeigneten Einfamilienhäusern installiert, was 246 Gebäuden entspricht.

In Tabelle 51 ist der Gas- und Strombezug für das Wärmepumpenszenario im Vergleich zu dem Szenario nur mit Photovoltaik und dem Ist-Zustand aufgeführt. Im Vergleich zum Ist-Zustand bezieht das Wohnquartier 34 % weniger Energie durch den Einsatz von Photovoltaik und Wärmepumpen. Im Vergleich zum Szenario nur mit Dämmmaßnahmen und Photovoltaik ist der Bezug um 15 % geringer.

Tabelle 51: Strom- und Gasbezug des Wohnquartiers in den Szenarien.

Szenario	Gasbezug in MWh/a	Strombezug in MWh/a
Ist-Zustand	11.991	4.292
PV 2050 nur wohnen	9.592	3.035
PV & WP 2050 nur wohnen	7.138	3.585

In Abbildung 250 ist die statistische Verteilung des Zusammenhangs zwischen der normierten Stromerzeugung der Solardachsteinen und dem normierten Strombedarf der Wärmepumpen dargestellt. Die zentrale Dichteverteilung verdeutlicht, dass hohe Strombedarfe der Wärmepumpen überwiegend bei geringer oder fehlender PV-Stromerzeugung auftreten. Umgekehrt fällt ein Großteil der PV-Stromerzeugung in Zeiträume mit niedrigem Strombedarf der Wärmepumpen. Diese Verteilung spiegelt die saisonalen Unterschiede beider Technologien wider. Der Strombedarf der Wärmepumpen ist vor allem in den Wintermonaten hoch, während die Photovoltaikerträge überwiegend im Sommer auftreten. Dadurch ergibt sich nur eine begrenzte zeitliche Überschneidung zwischen Stromerzeugung und Strombedarf. Für eine effiziente Nutzung des lokal erzeugten PV-Stroms für die Wärmepumpen sind daher zusätzliche Maßnahmen wie elektrische Speicher oder eine flexible Betriebsweise der Wärmepumpen erforderlich.

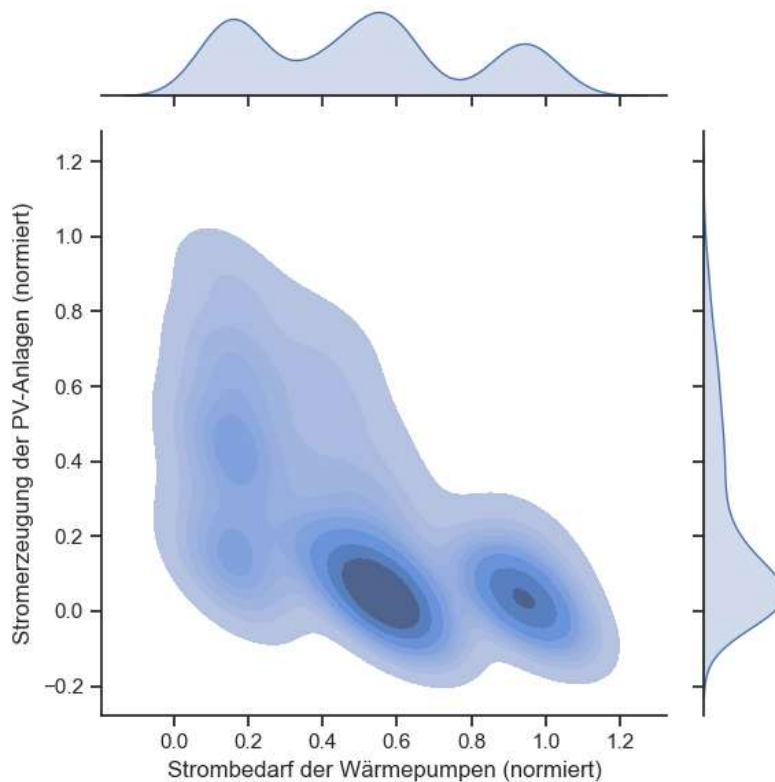


Abbildung 250: Verteilung des normierten Strombedarfs der Wärmepumpen bei normierter Stromerzeugung der Solardachsteine.

II.6.3.1.3.6 Szenario KWK-System

In AP 3.2 wurden die Integration von KWK-Systemen in das Quartiersmodell untersucht. KWK-Systeme besitzen Potenzial hinsichtlich der Reduktion von CO₂-Emissionen. Ferner kann durch einen Technologiewechsel von alten Heizkesseln hin zu innovativen KWK-Systemen der Primärenergieeinsatz reduziert werden, sodass insgesamt durch den Einsatz von KWK-Systemen ein entscheidender Beitrag zur Erreichung der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung geleistet werden kann.

Um die CO₂-Einsparpotenziale durch den Einsatz von KWK-Systemen in dem betrachteten Quartier der Margarethenhöhe analysieren zu können, wurde ein am GWI bestehendes KWK-Modell in das Quartiersmodell integriert, das im Zuge des Projektes entwickelt wurde. Des Weiteren wurden Simulationen durchgeführt, um die Wechselwirkung des KWK-Systems und des Gebäudemodells zu überprüfen. Im Projekt wurde der Einsatz von Mikro-KWK-Systemen in den Einzelgebäuden evaluiert. Mikro-KWK-Systeme bieten durch die Erzeugung von Wärme und Strom eine höhere Effizienz als ein getrennter Bezug aus dem Netz. Langfristig bieten diese Systeme jedoch nicht die ökologischen Einsparungen, die für eine emissionsarme Wärmeversorgung notwendig sind. Da alle Systeme mit Erdgas betrieben werden und ein Wechsel zu einer reinen Wasserstoffinfrastruktur unwahrscheinlich ist, werden die Anlagen über ihre Lebensdauer weitestgehend die gleichen, an den Brennstoff Erdgas geknüpften Emissionen aufweisen. Ein Wechsel zu Wärmepumpen bietet dagegen das Potenzial einen Energieträger zu nutzen der mit der Zeit immer grüner wird. Gleichzeitig nutzen Wärmepumpen Umweltwärme und sind dadurch auf deutlich weniger Bezugsenergie angewiesen.

Des Weiteren soll die Marktverfügbarkeit der Wärmeerzeuger berücksichtigt werden. Nachdem in den 2010er Jahren einige Hersteller mit Mikro-KWK-Systemen auf den Markt gedrängt sind, sind mittlerweile viele Systeme wieder vom Markt verschwunden. Im Leistungsbereich für kleine Einfamilienhäuser sind in Deutschland faktisch keine Geräte mehr verfügbar. In einigen Fällen hat sich zudem gezeigt, dass die Zuverlässigkeit der Anlagen nicht immer gegeben war. Daher sollten Mikro-KWK-Systeme in der Wärmeversorgung der Margarethenhöhe nicht berücksichtigt werden. Es wird ein Szenario mit einem größeren BHKW untersucht, welches über ein kleines Nahwärmenetz angrenzende Gebäude mit Wärme versorgt (siehe Abbildung 252). Bei einem zentralen Einsatz größerer BHKWs ist die Dekarbonisierung des Brennstoffs leichter zu erreichen und Modelle sind am Markt verfügbar.

Zur Bestimmung der Eignung des Quartiers für Wärmenetze wurde die Wärmelinienichte für die einzelnen Straßenabschnitte mithilfe der berechneten Wärmebedarfe der Gebäude nach Sanierung und der Länge der Straßen bestimmt. In Abbildung 251 ist das Ergebnis dargestellt. Als Klassengrenze wurde die laut des C.A.R.M.E.N. Merkblatts nötige Wärmelinienichte, um die prozentualen Wärmeverluste zu begrenzen, von $1.500 \frac{kWh}{m \cdot a}$ und dem laut Wolff und Jagnow [23] unteren wirtschaftlichen Grenzwert von $1.800 \frac{kWh}{m \cdot a}$ verwendet.

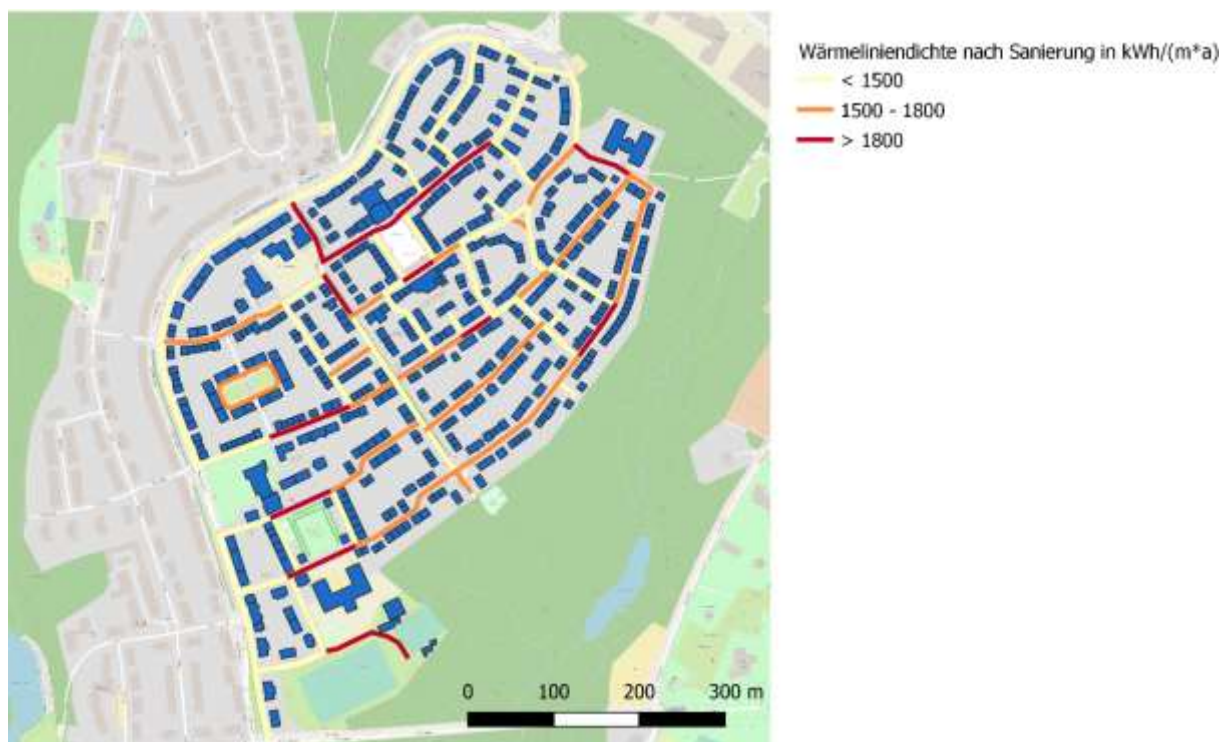


Abbildung 251: Berechnete Wärmelinienichte des Quartiers nach angenommener Sanierung der Gebäude; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).

Im Quartier befindet sich ein Hotel, das sich laut der berechneten Wärmelinienichte als Standort für eine KWK-Anlage anbietet. Im simulierten Szenario werden 26 angrenzende Gebäude durch eine KWK-Anlage, die im Hotel stationiert ist, zusätzlich mit Wärme versorgt. In Abbildung 252 ist der angenommene Verlauf dieses Nahwärmenetzes dargestellt. Durch Simulationen lassen sich die CO₂-Einsparungen durch die KWK-Anlage bestimmen.



Abbildung 252: Verlauf eines möglichen Nahwärmenetzes (dunkelrot) in der Margarethenhöhe. Das Hotel ist das große zweiteilige Gebäude in der Mitte der Detaildarstellung; Hintergrundkarten von OpenStreet-Map (© OpenStreetMap-Beitragende).

Das Modell des Blockheizkraftwerks (BHKW), das zur Versorgung des Nahwärmenetzes eingesetzt wird, regelt die Wärmebereitstellung auf eine konstante Vorlauftemperatur von 55 °C. Bei hoher Last wird ein Zusatzheizgerät zugeschaltet, während bei geringer Last unter 30 % der Nennleistung ausschließlich das Zusatzheizgerät betrieben wird, um ineffizienten Teillastbetrieb zu vermeiden. Die Rohrdimensionierung des Nahwärmenetzes erfolgt unter Annahme üblicher Strömungsgeschwindigkeiten von etwa $1 \frac{m}{s}$. Die Hausstationen sind als indirekte Übergabestationen mit einer Temperaturspreizung von 20 K modelliert. Der erforderliche Massenstrom ergibt sich aus der vorgegebenen Spreizung und dem Wärmebedarf der jeweiligen Gebäude.

Das BHKW im dargestellten Szenario kommt im simulierten Zeitraum eines Jahres auf ca. 4.500 Volllaststunden. Wird der Verlauf der Stromproduktion des BHKWs und der Verlauf des Strombezugs der an das Wärmenetz angeschlossenen Gebäude in Bezug zueinander gesetzt, so kann ein Selbstversorgungsgrad von ca. 70 % erreicht werden. Der jährliche Gasbezug ist im Vergleich zu dem Szenario, in dem alle Gebäude mit einem eigenen Gaskessel ausgestattet sind, jedoch um ca. 55 % höher. Legt man die momentanen CO₂-Emissionsfaktoren für Strom und Gas zugrunde, ließen sich durch das Wärmenetz leichte CO₂-Einsparungen erzielen.

Eine KWK-Anlage produziert gleichzeitig Strom und Wärme, wodurch sich verschiedene mögliche Fahrweisen ergeben. Wärmegeführte KWK-Anlagen stellen dabei den Standardanwendungsfall dar, da die Wärmeversorgung immer sichergestellt sein muss. Andere Optionen sind stromgeführte, stromorientierte oder netzgeführte Fahrweisen. Im Hinblick auf ein Energiekonzept für das gesamte Quartier erscheint eine stromorientierte Fahrweise der KWK-Anlagen am sinnvollsten. Die KWK-Anlage sorgt für die Deckung des Wärmebedarfes einer bestimmten Anzahl der Gebäude im Quartier auf netzdienliche Weise. Das bedeutet, sie muss mit einer intelligenten Regelung ausgestattet sein und mit einem thermischen Speicher, der ihr die nötige Flexibilität gibt, die Wärme zu erzeugen, wenn auch Strombedarf im Quartier besteht. Dadurch können

sich höhere Investitionskosten als bei einer wärmegeführten Anlage ergeben. Durch die Vielzahl der Stromabnehmer im Quartier wird ein zusätzlicher elektrischer Speicher erst notwendig, wenn ein Großteil der Gebäude durch KWK-Anlagen versorgt wird. Gerade auch, da in anderen Gebäuden installierte Wärmepumpen zu denselben Zeiten viel Strom benötigen, in denen die KWK-Anlagen den Strom zur Verfügung stellen. Zusätzlich stehen durch den Ausbau von Photovoltaik in Verbindung mit elektrischen Speichern im Winter theoretisch freie Speicherkapazitäten für den KWK-Strom zur Verfügung.

II.6.3.1.3.7 Regelungskonzepte

Für die hausinternen Regelungssysteme werden vereinfachte Regelungen verwendet, um die Simulationszeiten zu minimieren. Für Systeme, die autark ohne Einfluss des Netzzustandes geregelt werden, werden im Quartiersmodell Zeitreihen hinterlegt. Bei der Generierung dieser technologiespezifischen Zeitreihen wird die jeweilige Regelung berücksichtigt.

Zur Entwicklung der quartiersbezogenen Regelungsstrategie wird zunächst das Quartier im Ist-Zustand mit konventioneller Regelung aller Systeme abgebildet. Dieses Modell dient als Grundlage, um einen vereinfachten prädiktiven Ansatz zur Regelung des Gesamtsystems zu entwickeln. Durch die Integration von weiteren Erzeugern wie PV- oder KWK-Anlagen und von zusätzlichen Speichern (thermisch oder elektrisch) ergeben sich neue Anforderungen an die Vernetzung des Quartiers. Das Modell und die Simulationsergebnisse wurden im Rahmen der vorangegangenen Abschnitte dargestellt.

Übergeordnetes Ziel der quartiersbezogenen Regelung ist es, möglichst viel der im Quartier erzeugten Energie direkt im Quartier zu verbrauchen, um so auch das Netz zu entlasten, wobei die thermische Behaglichkeit für die Bewohner erhalten bleiben soll. Dafür werden Speicher benötigt, die eine zeitliche Entkopplung der Erzeugung und des Verbrauchs erst ermöglichen. Elektrische Speicher bieten die Möglichkeit, überschüssige Erzeugung der elektrisch aktivierten Dachsteine zu speichern und später bereitzustellen. Beim Blick auf das gesamte Quartier haben die Speicher erst einen Nutzen, wenn durch die Dachsteine mehr Strom produziert wird als im gesamten Quartier gerade benötigt, ansonsten haben sie durch Verluste wie beim Be- und Entladen sogar einen negativen Effekt auf die Versorgung des Quartiers. Durch eine prädiktive Regelung der elektrischen Speicher können auch Lastspitzen abgefangen werden.

Wärmepumpen können in Verbindung mit thermischen Speichern dahingehend flexibilisiert werden, dass sie den thermischen Speicher vorrangig befüllen, wenn Solarstrom zur Verfügung steht. KWK-Systeme, die bei der Wärmebereitstellung gleichzeitig Strom erzeugen, können stromorientiert betrieben werden, d. h. sie werden vorrangig eingeschaltet, wenn auch Strombedarf besteht und speichern möglichen Wärmeüberschuss in thermischen Speichern. Bei vorhandenem Stromüberschuss im Netz wird die Wärme aus den thermischen Speichern bereitgestellt. Im Folgenden wird die Regelung der elektrischen Speicher näher betrachtet und optimiert.

Zum Testen und Bewerten effektiver Regelungsstrategien muss der Berechnungsaufwand des numerischen Modells reduziert werden. Daher wird aus dem Gesamtmodell des Quartiers ein Untermodell extrahiert, d. h. ein Straßenzug mit 18 Gebäuden, wobei es sich bei 12 Gebäuden um Ein- und Zweifamilienhäuser und bei sechs um Mehrfamilienhäuser handelt, siehe Abbildung 253. Unter der Berücksichtigung des in AP 3.4 beschriebenen Sanierungsszenarios für das Jahr 2030 wird für sechs Haushalte je eine PV-Anlage und ein entsprechender Batteriespeicher mit einer Kapazität von fünf bis 15 kWh implementiert. Das Untermodell wird aus der Dymola Software als Functional-Mock-up Unit (FMU) exportiert und durch eine eigens am GWI entwickelte Softwarebibliothek *pycontrolfm* in der Programmiersprache Python bedient. Durch den objekt-

orientierten, modularen Aufbau der Softwarebibliothek *pycontrolfmu* können verschiedene Regelungsstrategien implementiert und getestet werden.

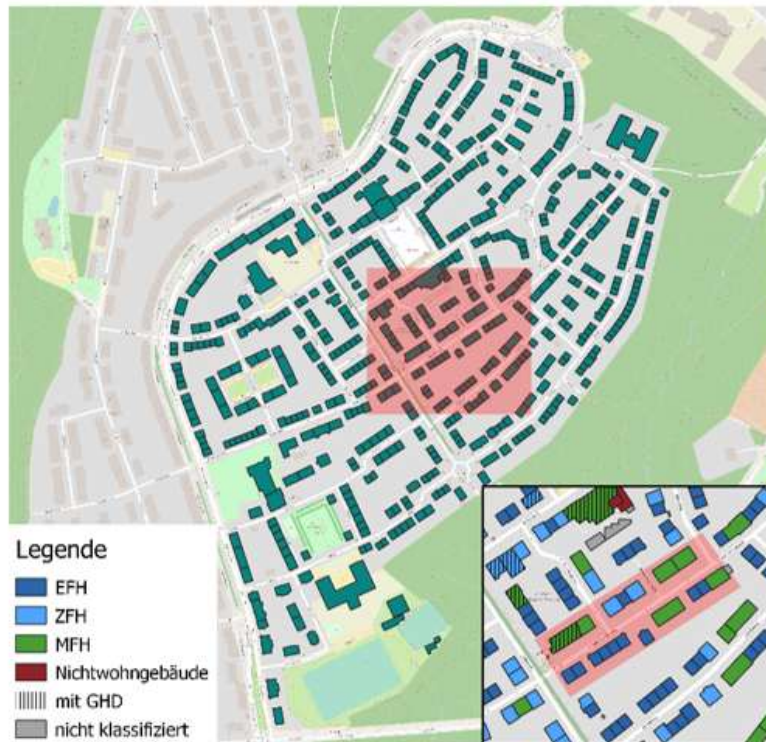


Abbildung 253: Erstes Untermodell zur Erprobung der Regelung; Hintergrundkarte von OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Beitragende).

In einem ersten Schritt wird eine Regelung analog zu der in Modelica basierend auf einer zeitlich lokalen Bilanzierung der durch die PV-Anlagen zur Verfügung gestellten Leistung und der Last der Wohneinheiten implementiert. Sobald die elektrische Last niedriger ist als die durch die PV-Anlage bereitgestellte Leistung, wird diese benutzt, um den Batteriespeicher zu laden. Die Batterie kann dann dazu benutzt werden, Leistungsspitzen abzufedern, siehe Abbildung 254. Für diesen Regelungsansatz werden eine perfekte Vorhersage des Wetters und der elektrischen Last angenommen, sodass diese Regelung als Vergleichsfall dient.

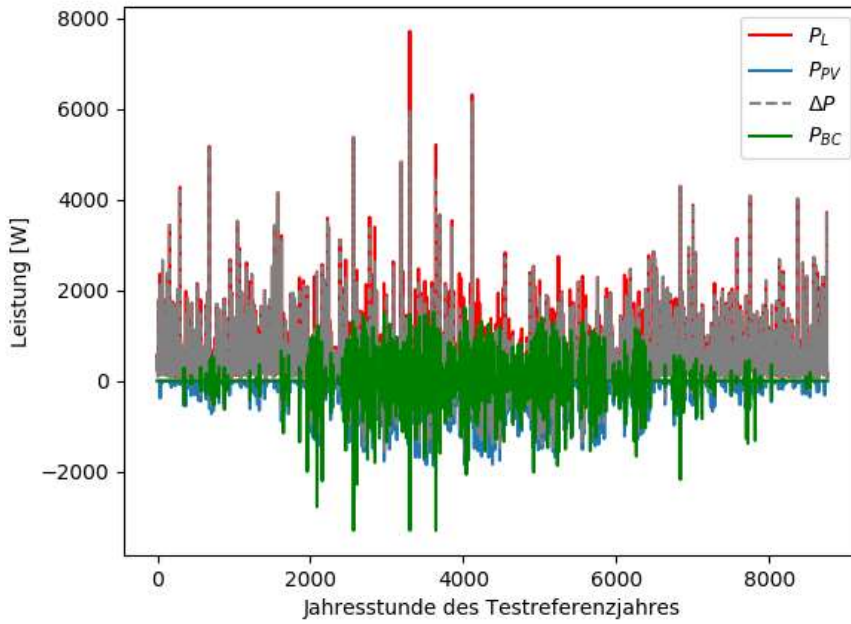


Abbildung 254: Zeitreihe der elektrischen Last (P_L), der bereitgestellten Leistung der PV-Anlage (P_{PV}), der Residuallast (ΔP) und der Lade-/Entladeleistung des Batteriespeichers (P_{BC}) für ein exemplarisches Gebäude.

Zusätzlich wurde eine Regelung basierend auf dem Ansatz der Modellprädiktiven Regelung (MPC – Model Predictive Control) implementiert. Dazu wird zu jedem Zeitpunkt k die über einen definierten Vorhersagehorizont bestmögliche Regelung gesucht, die den externen Strombezug reduziert (Autarkieprinzip), siehe Abbildung 255. Dafür wird ein Optimierungsproblem gelöst

$$u = \arg \min_{\hat{u}} \sum_{i,k}^{I,K} (P_{grid,k} - \hat{u}_{i,k})^2$$

unter den Nebenbedingungen (N.B.)

$$\begin{aligned} SOC_{i,k+1} &= SOC_{i,k} + u_{i,k} \Delta T \\ SOC_i^{min} &< SOC_{i,k} < SOC_i^{max} \\ u_i^{min} &< u_{i,k} < u_i^{max} \end{aligned}$$

mit Batterieladezustand (State of Charge) $SOC_{i,k}$, der elektrischen Leistung des Gesamtquartiers $P_{grid,k}$ und der Kontrollvariable $u_{i,k}$ als Lade-/Entladeleistung für jede Batterie i zum Zeitpunkt k . Das quadratische Optimierungsproblem ist in der open-source Python Bibliothek pyomo realisiert und wird durch den dort verfügbaren Interior Point Optimizer (Ipopt) gelöst [24]. Der Vorhersagehorizont K umfasst 24 Stunden, sodass zu jedem Zeitpunkt eine Vorhersage des Leistungsbedarfs des Quartiers und der solaren Einstrahlung vorliegen muss.

Ergänzend zum vorgestellten Quartiersmodell wird ein weiteres Untermodell entwickelt, welches anhand der Gebäude, zu denen im Rahmen des Projektes Daten über Smart-Meter gesammelt werden, spezifiziert wird. Dieses Untermodell enthält folglich elf Gebäude, von denen acht mit Photovoltaik und Batterien ausgestattet werden. Eine perfekte Vorhersage der Größen wird an-

hand der vorliegenden Smart-Meter Zeitreihen für den Leistungsbedarf und der historischen Daten der solaren Einstrahlung für den Betrachtungszeitraum Januar bis Dezember 2020 angenommen. Für die solare Einstrahlung wird auf Daten des Copernicus Atmosphere Monitoring Service [25] zurückgegriffen. Dieses Datenprodukt stellt basierend auf Satellitendaten georeferenzierte Einstrahlungswerte als Zeitserie kostenfrei zur Verfügung.

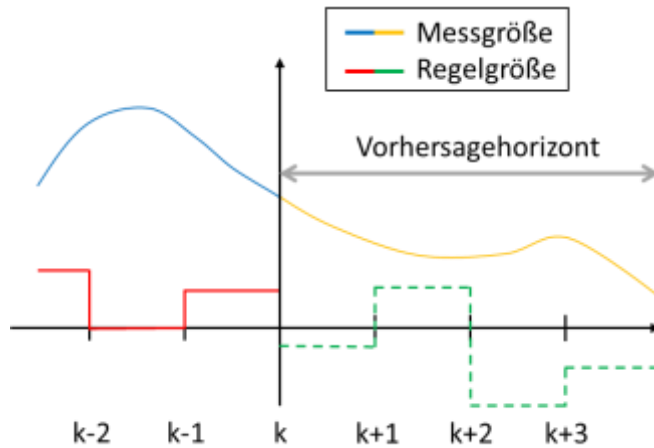


Abbildung 255: Darstellung einer Model-prädiktiven Regelung (MPC) für ein zeitdiskretes System.

In Abbildung 256 wird exemplarisch die Kappung der Leistungsspitzen aufgrund der MPC-basierten Regelung gezeigt. Die MPC-basierte Regelung (grün) zeigt niedrigere absolute Leistungswerte im Vergleich zur Zeitserie des Leistungsbedarfs im Quartier ohne Regelung (grau).

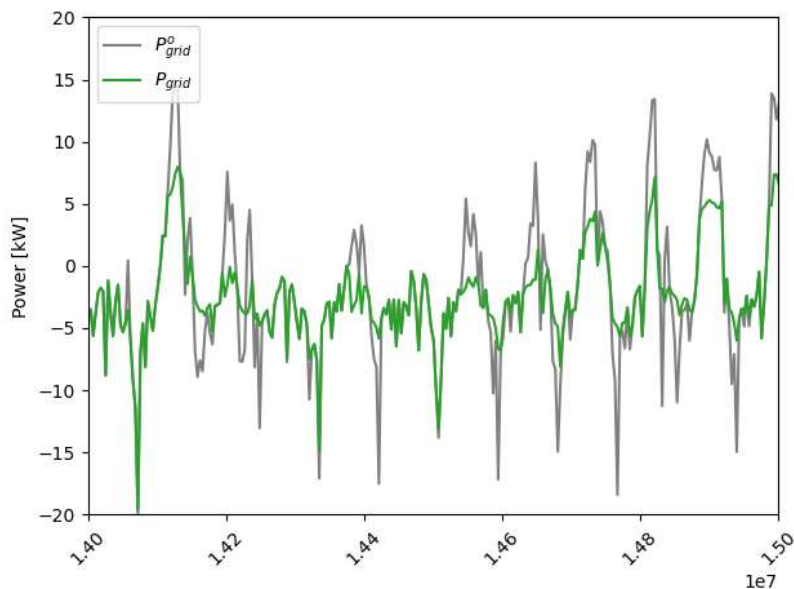


Abbildung 256: Leistungskurven des Unterquartiers für den Fall ohne Regelung (grau) und mit MPC-Regelung (grün).

In Tabelle 52 sind die Ergebnisse für eine Jahressimulation des Untermodells mit den Smart Meter-Gebäuden aufgelistet. Die Simulation mit der MPC-Regelung dauert deutlich länger als die Simulationen mit den einfachen Batterieregelungen, die Deckung des Strombedarfs der Gebäude durch den PV-Strom lässt sich durch die Regelung jedoch auch leicht erhöhen.

Tabelle 52: Vergleich der Simulationszeit und der Netzbelastung für eine Jahressimulation des Untermodells mit elf Gebäuden.

Modell	CPU Time in s	$\sum abs(P(t)^{grid})$ in $\frac{MWh}{a}$
Ohne Regelung (Dymola/Modelica)	46	52,5
Mit Batterieregelung		
- Dymola/Modelica	167	48,5
- Python	333	49,5
MPC (FMU, pyomo)	1.461	47,5

II.6.3.1.3.8 Geschäftsmodelle

Eine energetische Sanierung soll neben dem Energiebedarf auch die Emissionen von (Wohn-) Gebäuden senken. Im Idealfall gehen die Energie- und CO₂-Einsparungen zudem mit geringeren Kosten einher, sodass eine energetische Sanierung neben einem ökologischen auch einen ökonomischen Mehrwert bietet. Um Anreize für eine energetische Sanierung zu schaffen, bieten Bund, Länder und Kommunen unterschiedliche Fördermöglichkeiten.

Bei der Sanierung von Bestandsgebäuden stellen Baudenkmäler wie die Gebäude der Margarethenhöhe eine besondere Herausforderung dar. Bestimmte Maßnahmen zur Verringerung des Heizwärmebedarfs, wie etwa eine Außendämmung der Fassade, würden das Erscheinungsbild und die bauliche Ausprägung des Stadtteils deutlich verändern und sind daher in der Regel nicht genehmigungsfähig. Daher müssen andere Wege gefunden werden, um einerseits die Vorgaben des Denkmalschutzes zu erfüllen und andererseits eine energetische Sanierung zu ermöglichen. Da diese häufig mit höherem Planungs- und Ausführungsaufwand und damit mit höheren Kosten verbunden sind als bei nicht denkmalgeschützten Gebäuden, werden Sanierungen an denkmalgeschützten Gebäuden in besonderer Weise gefördert.

Dieses Kapitel untersucht die Wirtschaftlichkeit denkmalgerechter energetischer Sanierungsmaßnahmen und betrachtet dazu die entstehenden Kosten sowie mögliche Finanzierungsansätze. Das Kapitel ist von besonderer Relevanz, da die Gebäude der Margarethenhöhe sowohl Teil einer Stiftung sind als auch dem Denkmalschutz unterliegen. Die hohen Kosten einer energetischen Sanierung müssen aufgefangen werden, um die Liquidität der Stiftung langfristig garantieren zu können. Sofern die Sanierung nicht finanziert werden kann, besteht das Risiko, dass die energetische Ertüchtigung des Quartiers insgesamt nicht umgesetzt werden kann.

Für die Untersuchungen in diesem Kapitel werden nur die Wohngebäude im Quartier berücksichtigt, da die Umsetzung auch an diesen demonstriert wird. Anders als bei den vorherigen Szenarien werden hier maximale Sanierungsszenarien betrachtet mit teilweise modifizierten Annahmen, weswegen Ergebnisse voneinander abweichen können. Als Ausgangspunkt der ökonomischen Untersuchung dient der aktuelle Stand der Wärmeversorgung im Quartier Margarethenhöhe. Hierfür wurden die Wärmebedarfe der einzelnen Gebäude im Quartier ermittelt und zu einem Gesamtwert zusammengeführt. Der kombinierte Heizwärmebedarf beträgt rund 10,60 GWh pro Jahr. Derzeit wird das Quartier überwiegend durch Gasheizwertgeräte versorgt, ergänzt durch Gasbrennwertgeräte sowie Stromheizungen in Form von Nachtspeicherheizungen.

In der Untersuchung zur energetischen Sanierung des Quartiers wurden mehrere gebäudebezogene Maßnahmen berücksichtigt. Dazu zählen eine Innendämmung in Form eines Dämmputzes, die Dämmung der Dachflächen sowie der Austausch der Fenster. Diese Maßnahmen führen in Summe zu einer deutlichen Reduktion des Heizwärmebedarfs. Dabei werden Mittelwerte für die

Ein- und Mehrfamilienhäuser der Tabula-Werte für die Heizwärmebedarfsreduktion angenommen [4]. Der jährliche Heizwärmebedarf sinkt demnach von rund 10,60 GWh pro Jahr auf 6,21 GWh pro Jahr. Das entspricht einer Einsparung von 41 Prozent gegenüber dem Ausgangszustand. Das Ergebnis ist in Abbildung 257 dargestellt.

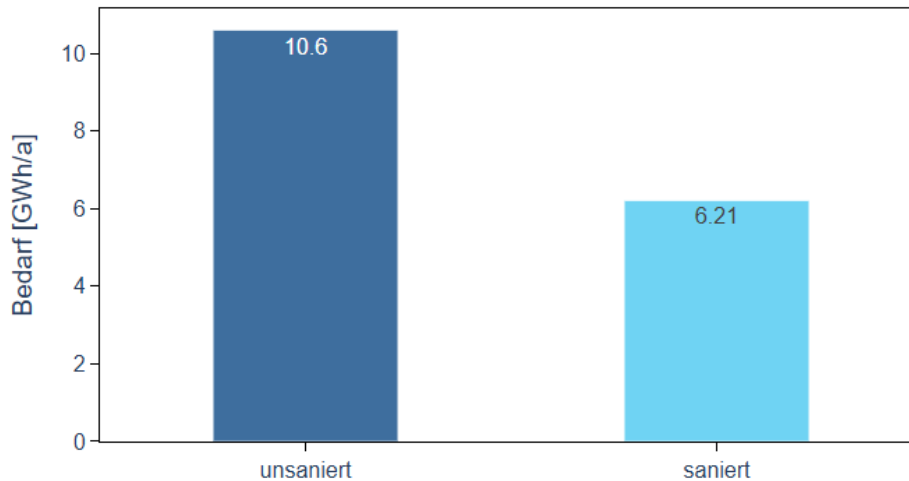


Abbildung 257: Jährliche Heizwärmebedarfe des gesamten Quartiers Margarethenhöhe.

Neben den Maßnahmen zur Gebäudedämmung wurde in den Simulationen auch ein Wechsel der Heiztechnologie berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass alle dafür geeigneten Gebäude der Margarethenhöhe mittel- bis langfristig mit Erdwärmepumpen ausgestattet werden. Durch den Wechsel auf Wärmepumpentechnik sinkt der Endenergiebedarf deutlich, da ein großer Teil der benötigten Wärme aus Umweltenergie bereitgestellt wird. Zu Vergleichszwecken wurde ebenfalls der Wechsel von Heizwertgeräten zu effizienteren Brennwertgeräten abgebildet (siehe Abbildung 258).

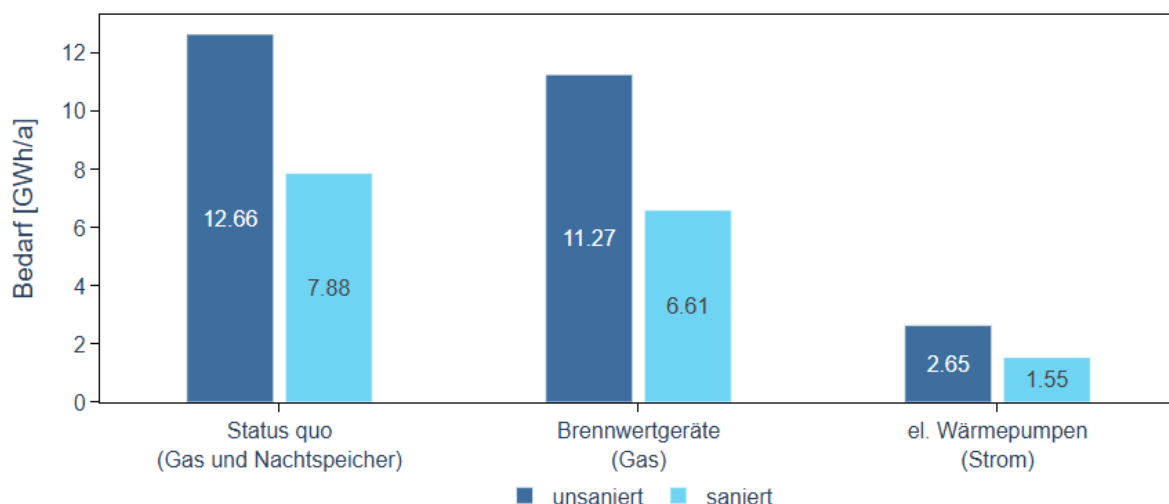


Abbildung 258: Jährliche Endenergiebedarfe des gesamten Quartiers Margarethenhöhe in unterschiedlichen Szenarien.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Austausch der bestehenden Wärmeerzeuger durch Gasbrennwertgeräte nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den jährlichen Energiebedarf hat. Im unsanierten Zustand sinkt der Bedarf gegenüber dem Status quo von 12,66 GWh pro Jahr auf

11,27 GWh pro Jahr. Das entspricht einer Reduktion von rund 11 %. Auch im sanierten Zustand fällt der Unterschied zwischen Status quo und Brennwerttechnik moderat aus.

Deutlich stärker wirkt sich dagegen die Umstellung auf elektrische Wärmepumpen aus, insbesondere bei hohen Jahresarbeitszahlen, wie sie bei Erdwärmepumpen mit Sondenbohrungen erreichbar sind. Im unsanierten Zustand reduziert sich der Energiebezug auf 2,65 GWh pro Jahr. In Kombination mit den Sanierungsmaßnahmen sinkt er weiter auf 1,55 GWh pro Jahr. Bezogen auf den sanierten Status quo entspricht das einer Einsparung von gut 80 %. Das Ergebnis verdeutlicht, dass die Sanierung der Gebäudehülle den Energiebedarf deutlich reduziert, der wesentliche zusätzliche Rückgang des jährlichen Energiebezugs jedoch erst durch die Umstellung auf Wärmepumpentechnik erreicht wird.

Diese Energieeinsparungen wirken sich unmittelbar auf die durch die Wärmeversorgung des Quartiers verursachten CO₂-Emissionen aus (siehe Abbildung 259). Zum einen reduzieren die Sanierungsmaßnahmen den benötigten Wärmebedarf und damit die Emissionen direkt, unabhängig von der eingesetzten Heiztechnik. Zum anderen verändert ein Wechsel der Heiztechnologie die spezifischen Emissionen der bereitgestellten Wärme. Die spezifischen Emissionen der Erdgasverbrennung sind in den vergangenen Jahren weitgehend konstant geblieben, da bislang nur in begrenztem Umfang erneuerbare Gase in das Gasnetz eingespeist werden. Die spezifischen Emissionen des deutschen Strommixes gehen dagegen kontinuierlich zurück. Zwar werden bei der Stromerzeugung heute noch in relevantem Umfang fossile Energieträger eingesetzt, dennoch führt der Einsatz von Wärmepumpen bereits unter heutigen Bedingungen zu einer deutlichen Emissionsreduktion, da sie aus einer Kilowattstunde Strom ein Mehrfaches an nutzbarer Wärme bereitstellen und damit den Primärenergieeinsatz gegenüber direkten Verbrennungsheizungen deutlich senken. Mit Blick auf die langfristige Entwicklung ist zudem davon auszugehen, dass die Stromerzeugung bis 2050 zunehmend in Richtung CO₂-Neutralität transformiert wird [25]. Dadurch verbessern sich die Emissionsvorteile von Wärmepumpensystemen weiter, sodass perspektivisch ein nahezu emissionsfreies Heizen möglich wird.

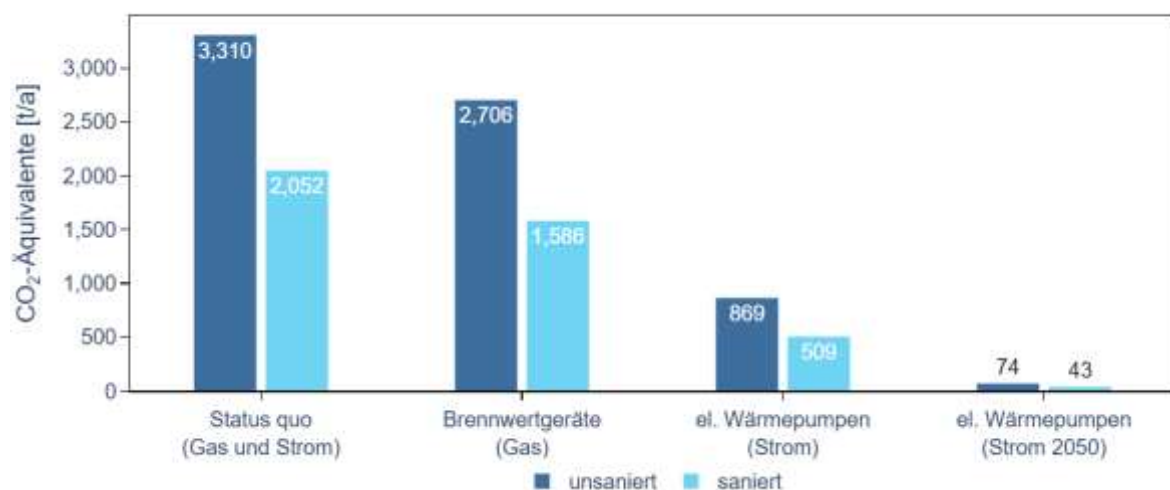


Abbildung 259: Treibhausgasemissionen des gesamten Quartiers Margarethenhöhe in unterschiedlichen Szenarien.

Diese Daten bilden die Grundlage für eine ökonomische Betrachtung. Im Folgenden wird die finanzielle Umsetzbarkeit der Sanierungsmaßnahmen bewertet. Um die Kosten besser abschätzen zu können, wurden zusätzliche relevante Charakteristika der Gebäude mithilfe der vorhandenen Daten bestimmt, wie z.B. die Länge der Außenwände und die Anzahl der Geschosse zur Bestimmung der Wandflächen, die gedämmt werden können. Ziel ist es, ein geeignetes Ge-

schäftsmodell zu entwickeln, mit dem sich die entstehenden Investitionskosten tragen lassen. Dabei stehen die zusätzlichen Investitionskosten für Sanierung und Technologiewechsel den Einsparungen bei den Energiekosten gegenüber. Die entstehenden Kostenvorteile können grundsätzlich dazu genutzt werden, die Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen ganz oder teilweise zu finanzieren. Ein mögliches Geschäftsmodell ist in diesem Zusammenhang die Warmmietenneutralität. Dabei werden die durch die Sanierung erzielten Einsparungen bei den Heizkosten in Form einer Anpassung der Kaltmiete teilweise oder vollständig weitergegeben, sodass sich die Warmmiete für die Mietenden im Idealfall nicht erhöht.

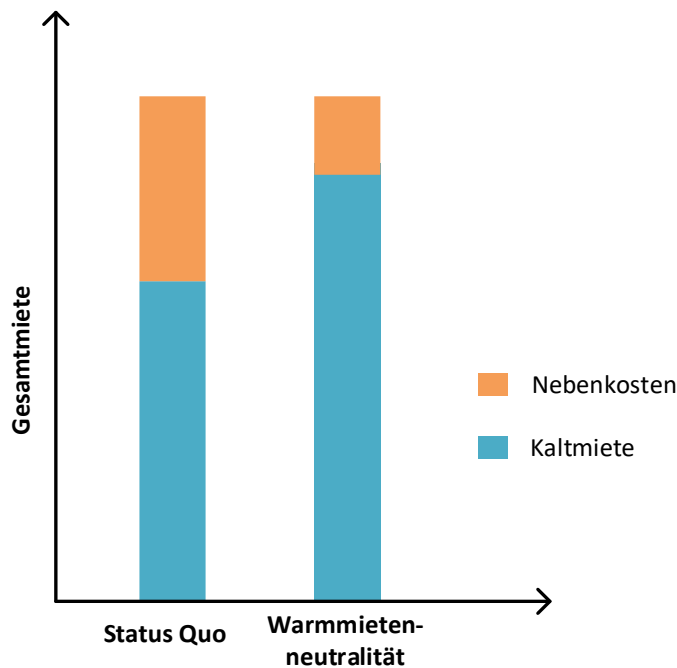


Abbildung 260: Darstellung der Warmmietenneutralität.

Wie in Abbildung 260 dargestellt, bleibt die Gesamtmierte für die Bewohner gleich, es erhöht sich lediglich die Kaltmiete um den Teil, den die Nebenkosten abnehmen. Dieser Anteil soll dann genutzt werden, um die Kosten der Sanierung zu tragen.

Im Verlauf des Projektes wurden zwei Einfamilienhäuser und drei Wohnungen saniert, sodass reale Kosten für die jeweiligen Maßnahmen vorliegen. Da ein Großteil der Gebäude auf der Margarethenhöhe Ein- und Zweifamilienhäuser sind und sich Komponenten wie eine Wärmepumpe und die dazugehörige Sondenbohrung nur unzureichend auf einzelne Wohnungen aufteilen lassen, wurden in der ökonomischen Betrachtung vor allem die beiden sanierten Einfamilienhäuser berücksichtigt.

Die realen Kosten übersteigen die im Vorfeld getätigten Annahmen aus der Literatur deutlich. Dabei muss berücksichtigt werden, dass in den Literaturquellen nicht immer denkmalgeschützte Objekte die Betrachtungsgrundlage bilden und dass besonders die Corona Pandemie und die nachfolgende wirtschaftliche Situation in Deutschland die Preise nach oben getrieben haben könnten. Zusätzlich handelt es sich um eine erste Erprobung der Sanierungsmaßnahmen, wodurch ebenfalls erhöhte Kosten zu erwarten sind, die insbesondere auf fehlende Erfahrungswerte und noch nicht optimierte Prozesse zurückzuführen sind. Die Fremdfinanzierung erhöht die Gesamtkosten weiter.

Das zweite Gebäude weist in etwa ähnliche Kosten auf, wobei die Gegebenheiten vor Ort teilweise unterschiedlich waren, sodass einzelne Positionen sich mitunter unterscheiden können. Einen Einfluss auf die Kosten hat am Beispiel des Innendämmputzes die Art des Gebäudes.

Ein Reihenendhaus benötigt für die Dämmung der Außenwände mehr Dämmputz als ein Reihemittelhaus, das eine Außenfassade weniger besitzt.

Die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden wird auf unterschiedliche Arten gefördert. Für dieses Kapitel wurde daher die Förderlandschaft nach geeigneten Förderungen für die Denkmalsanierung durchsucht. Die höchsten Förderungen, insbesondere da es sich bei den Bestandsgebäuden um Denkmalschutzobjekte handelt, bietet zum Zeitpunkt der Bearbeitung die KfW mit dem Wohngebäudekredit Nr. 261. Das Programm bietet für Kredite geringere Zinsen als andere Banken und gewährt zudem einen Zuschuss für jede Wohneinheit. An dieser Stelle sei der Hinweis erbracht, dass die Förderlandschaft und die Konditionen der jeweiligen Förderungen fluide sind und die nachfolgenden Berechnungen mit einer deutlichen Varianz versehen sein können.

In der Kategorie Effizienzhaus Denkmal können, wenn die Maßnahmen eine Zuordnung zur Nachhaltigkeitsklasse erlauben, Kredite bis 150.000 € bei 2,7 % aufgenommen werden. Von diesem Kredit können 10 %, also bis zu 15.000 € als Tilgungszuschuss erhalten werden. Diese Förderung wird in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt. Eventuelle Kosten, die darüber hinaus gehen, werden mit 3,8% Zinsen betrachtet.

Die aus der Sanierung entstehenden Einsparungen bei den Nebenkosten werden den finanzierten Sanierungskosten gegenübergestellt. Wird die Amortisationsdauer dieser Investition bestimmt, zeigt sich, dass eine nachhaltige Finanzierung der energetischen Sanierungen über die Warmmietenneutralität nicht möglich ist. Auf Basis der getroffenen Annahmen liegt die Amortisationszeit außerhalb der üblichen wirtschaftlichen Betrachtungszeiträume. Dabei ist die Notwendigkeit von Ersatzinvestitionen noch nicht eingerechnet. Investitionen wie Wärmepumpen und Fußbodenheizungen haben eine gewisse Lebensdauer und müssen entsprechend ersetzt werden. Auch ist die Zinsbindung auf 30 Jahre festgelegt. Eine längere Verzinsung würde auch höhere Zinsen nach sich ziehen. Rein wirtschaftlich betrachtet ist die Sanierung, auch unter Berücksichtigung der aktuellen Förderungen, aus der Warmmietenneutralität alleine nicht zu realisieren. Werden die Maßnahmen auf das gesamte Quartier übertragen, amortisieren sich die Maßnahmen im Durchschnitt bei angenommener Warmmietenneutralität ebenfalls nicht.

Aus den Erkenntnissen der ökonomischen Untersuchung lassen sich Handlungsempfehlungen für die einzelnen Akteure im Bereich der Denkmalschutzsanierung ableiten. Für die Fördermittelgeber empfiehlt es sich, die bestehende Förderlandschaft im Hinblick auf die besonderen Anforderungen denkmalgeschützter Gebäude weiterzuentwickeln. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die vorliegende Untersuchung auf ein spezifisches Quartier beschränkt ist und daher nur unzureichend eine allgemeine Empfehlung für die Sanierung von Denkmälern geben kann. Für den konkreten Fall der Margarethenhöhe zeigt sich, dass eine energetische Sanierung in der untersuchten Form unter den aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, insbesondere bei den bestehenden Mietstrukturen, nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Eine allgemeine Erhöhung der Mieten erscheint dabei sowohl in ihrer Umsetzbarkeit begrenzt als auch nicht vereinbar mit den Zielen der Stiftung, bezahlbaren Wohnraum für alle Einkommensschichten bereitzustellen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass zukünftige Preisentwicklungen sowie mögliche Skaleneffekte durch eine zunehmende Standardisierung der Sanierungsmaßnahmen die wirtschaftliche Bewertung positiv beeinflussen können. Vor diesem Hintergrund besteht die Handlungsempfehlung für die MKS insbesondere in einer differenzierten Anpassung der vorgesehenen Sanierungsmaßnahmen. Die Kostenanalyse zeigt, dass vor allem die Fußbodenheizung in Kombination mit dem erforderlichen Bodenaufbau einen wesentlichen Anteil an den Gesamtkosten ausmacht. Insbesondere, wenn die Dämmmaßnahmen den gewünschten Umfang erreichen und den Wärmebedarf entsprechend reduzieren, kann gegebenenfalls auf eine Fußbodenheizung verzichtet werden, auch wenn dies mit Effizienzeinbußen verbunden ist.

II.6.3.1.4 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die im Verbundvorhaben EnQM gewonnenen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse zeigen, dass die energetische Weiterentwicklung eines denkmalgeschützten Wohnquartiers wie der Margarethenhöhe nicht über singuläre Einzelmaßnahmen, sondern nur über integrierte, objektspezifisch angepasste Sanierungskonzepte erfolgen kann. Ausgangspunkt hierfür ist die im Projekt bestätigte Erkenntnis, dass energetische Optimierung und Denkmalschutz grundsätzlich miteinander vereinbar sind, sofern die Maßnahmen systemisch entwickelt, simulationsgestützt vorbereitet und messtechnisch validiert werden. Die im Projekt realisierten Maßnahmen dienen ausdrücklich nicht der flächendeckenden Vollsanierung des Quartiers, sondern der exemplarischen Demonstration integrativer LowEx- und Vernetzungskonzepte unter denkmalrechtlichen Randbedingungen. Gerade daraus ergibt sich jedoch eine belastbare Grundlage für die Weiterentwicklung des Quartiers sowie für die Übertragung der Erkenntnisse auf vergleichbare Bestandsquartiere.

Für die konzeptionelle Weiterentwicklung des Quartiers ist zunächst festzuhalten, dass die energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle weiterhin die zentrale Grundlage aller weiterführenden LowEx-Konzepte bildet. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass insbesondere die innenseitige Hüllertüchtigung mit Hochleistungsdämmputz, die Ertüchtigung der Fenster, die Dämmung von Dach beziehungsweise oberster Geschossdecke sowie die thermische Trennung zwischen Keller und Wohnraum geeignet sind, die Transmissionswärmeverluste deutlich zu reduzieren und zugleich die Voraussetzungen für abgesenkte Systemtemperaturen zu schaffen. Damit wird die Hüllsanierung nicht als isolierte Effizienzmaßnahme verstanden, sondern als technische Voraussetzung für die erfolgreiche Kopplung mit Niedertemperatur-Wärmeübergabesystemen, Wärmepumpen, Speichern und gegebenenfalls regenerativer Stromerzeugung.

Aus den im Projekt entwickelten und bewerteten Einzelmaßnahmen ergeben sich zwei grundlegende Sanierungspfade, die in Abbildung 135 zusammengeführt sind. Das erste Maßnahmenpaket umfasst die Dämmung der Außenwände und die Ertüchtigung der Fenster. Es bildet damit einen vergleichsweise reduzierten, aber robusten Sanierungspfad, der insbesondere dort geeignet ist, wo weitergehende Eingriffe in Dach, Wärmeübergabe oder Energieerzeugung aus denkmalpflegerischen, konstruktiven oder wirtschaftlichen Gründen nur eingeschränkt möglich sind. Das zweite Maßnahmenpaket folgt demgegenüber einer umfassenden LowEx-Logik und kombiniert Dämmung, aktivierte Dachsteine, Fensterertüchtigung, Dachdämmung, thermische Trennung Keller zu Wohnraum, Stromspeicher, Erdwärmesonden, Fußbodenheizung und Wärmepumpe. Dieses Paket ist als systemisch optimierter Entwicklungspfad zu verstehen, bei dem Hüllverbesserung, Niedertemperaturbetrieb, Wärmeerzeugung und lokale regenerative Stromnutzung gezielt aufeinander abgestimmt werden.

Für die Weiterentwicklung des Quartiers folgt daraus, dass zukünftige Sanierungen nicht nach dem Prinzip einer einheitlichen Standardmaßnahme geplant werden sollten. Vielmehr ist ein mehrstufiger Entscheidungsansatz erforderlich, in dem zunächst die denkmalpflegerischen, konstruktiven und nutzungsbezogenen Randbedingungen des jeweiligen Gebäudes geprüft werden. Erst auf dieser Grundlage kann entschieden werden, ob ein reduzierter Hüllpfad oder ein umfassender LowEx-Pfad fachlich sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar ist. Hierfür sind klare objektspezifische Kriterien zu benennen: Eine Innendämmung mit Dämmputz setzt voraus, dass keine erhaltenswerte originale Innenbemalung betroffen ist. Aktivierte Dachsteine sind mit einer Neueindeckung verbunden und daher insbesondere bei zusammenhängenden Dachlandschaften mit ausgebauten und bewohnten Dachgeschossen nur eingeschränkt geeignet. Für die Entscheidung zwischen thermischen Speichern und Erdwärmesonden sind die Platzverhältnisse im Ge-

bäude und im Garten sowie die Zufahrtsmöglichkeiten für Bohrgeräte zu prüfen. Der Einbau einer Fußbodenheizung ist nur dort sinnvoll, wo dies mit der vorhandenen Innenraumstruktur, insbesondere mit erhaltenswerten Innentüren und Schwellen, vereinbar ist; zugleich ist eine Flächenheizung mit niedrigen Vorlauftemperaturen Voraussetzung für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe.

Die konzeptionelle Empfehlung für die Margarethenhöhe lautet deshalb, die weitere Quartiersentwicklung auf ein typologiebasiertes, aber objektspezifisch validiertes Maßnahmenkonzept zu stützen. Typologische Ähnlichkeiten innerhalb des Bestands können genutzt werden, um Planungsaufwand zu reduzieren und wiederkehrende Maßnahmenets vorzustrukturieren. Gleichwohl bleibt die konkrete Ausprägung der Sanierung im denkmalgeschützten Bestand stets am Einzelobjekt zu prüfen. Die im Projekt entwickelte Methodik aus Bestandsanalyse, Monitoring, thermisch-hygrischer Simulation, thermischer Gebäudesimulation und messtechnischer Validierung hat gezeigt, dass gerade diese mehrstufige Absicherung notwendig ist, um robuste und schadensfreie Sanierungslösungen abzuleiten. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse liegt damit weniger in fixen Kennwerten als in der übertragbaren Methodik der Konzeptentwicklung.

Für die Übertragung auf andere Quartiere ergibt sich daraus eine klare fachliche Schlussfolgerung: Übertragbar sind vor allem die Planungslogik, die Kombinierbarkeit der Sanierungsbau- steine und der systemische LowEx-Ansatz, nicht jedoch ohne Weiteres die konkrete Maßnah- mentiefe einzelner Gebäude. Andere denkmalgeschützte oder denkmalnahe Wohnquartiere kön- nen von den im Projekt entwickelten Konzepten insbesondere dann profitieren, wenn sie eine vergleichbare Problemlage aufweisen, also hohe Transmissionswärmeverluste, heterogene Heizsysteme, eingeschränkte Eingriffsmöglichkeiten in die äußere Erscheinung und zugleich ei- nen Bedarf an langfristig skalierbaren Transformationspfaden. In solchen Fällen lassen sich die im Projekt entwickelten Paketlogiken und Entscheidungsregeln unmittelbar als konzeptioneller Referenzrahmen nutzen. Voraussetzung bleibt jedoch stets eine objektspezifische Prüfung der bauphysikalischen Eignung, der technischen Integrationsfähigkeit und der denkmalpflegerischen Zulässigkeit.

Hinzu kommt, dass die im Projekt umgesetzten Lösungen in erheblichem Maße vom Demonstra- tions- und Forschungscharakter geprägt waren. Die Kostenstrukturen waren daher nicht unmit- telbar mit marktüblichen Standardmodernisierungen vergleichbar; insbesondere Prototypenent- wicklung, Monitoringinfrastruktur, Variantenuntersuchungen und erhöhter Koordinationsaufwand beeinflussten die Investitionsstrukturen wesentlich. Für eine Übertragung auf andere Quartiere folgt daraus, dass die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Sanierungskonzepte nicht aus den De- monstrator-Kosten direkt abgeleitet werden darf. Vielmehr ist von Skalierungs- und Standardisie- rungseffekten auszugehen, insbesondere bei Wärmepumpentechnik, Niedertemperatur-Wärme- übergabesystemen und PV-Integration. Die Übertragbarkeit der Konzepte ist damit technisch be- reits gut begründet, wirtschaftlich jedoch vor allem unter den Bedingungen einer weitergehenden Standardisierung und Serienanwendung zu bewerten.

Gleichzeitig ist die Aussagekraft einzelner Bausteine unterschiedlich weit abgesichert. Während die Hüllmaßnahmen, die Kopplung mit Niedertemperatur-Wärmeübergabe und die Einbindung von Wärmepumpen als konzeptionell belastbar gelten können, ist die Bewertung der SHDS be- ziehungsweise der thermisch-elektrisch aktivierten Dachsteine für die Anwendung im Quartier zum Berichtszeitpunkt nicht möglich. Es kann ausdrücklich festgehalten werden, dass auf keinem Dach der Objekte die SHDS eingebaut werden konnten. Die Übertragbarkeit dieses Bausteins ist deshalb derzeit nur unter Vorbehalt zu bewerten.

In der Zusammenfassung ergibt sich daraus folgende konzeptionelle Empfehlung zur Weiterentwicklung des Quartiers: Die weitere energetische Transformation der Margarethenhöhe sollte auf einem abgestuften Maßnahmenansatz beruhen, der eine priorisierte Hüllsanierung mit einem optionalen Ausbau zu umfassenden LowEx-Systemen verbindet. Gebäude, bei denen weitergehende Eingriffe technisch, denkmalpflegerisch und wirtschaftlich sinnvoll sind, sollten schrittweise in Richtung eines integrierten Systems aus Hüllverbesserung, Niedertemperatur-Wärmeübergabe, Wärmepumpe, gegebenenfalls regenerativer Dachnutzung sowie Speicher- und Regelungskomponenten weiterentwickelt werden. Für Gebäude mit begrenztem Eingriffsspielraum ist demgegenüber ein reduzierter Sanierungspfad vorzusehen, der zunächst die Hüllqualität verbessert und damit spätere Ausbaustufen vorbereitet. Der wesentliche übertragbare Erkenntnisgewinn des Projekts besteht damit in der Entwicklung eines flexiblen, typologisch anpassbaren und methodisch abgesicherten Sanierungskonzepts für denkmalgeschützte Wohnquartiere.

Die im Verbundvorhaben EnQM gewonnenen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse zeigen, dass die Weiterentwicklung der Margarethenhöhe in Richtung einer intelligenten Quartiersvernetzung nicht auf der Ebene einzelner Technologien entschieden werden kann, sondern auf einer systemischen Verknüpfung von Lasten, Erzeugern, Speichern, Kommunikationsstrukturen und Regelstrategien beruhen muss. Bereits die Projektzielsetzung formuliert die energetische Optimierung denkmalgeschützter Quartiere ausdrücklich als Zusammenspiel aus energetischer Sanierung, innovativer Gebäudetechnik sowie intelligenter elektrischer, thermischer und digitaler Vernetzung. Teilprojekt 3 hatte entsprechend die Aufgabe, die Einzelkomponenten in ein quartiersbezogenes Energiesystem zu integrieren, ein skalierbares Quartiersmodell zu entwickeln, Transformationsszenarien zu simulieren und intelligente Regelstrategien abzuleiten. Die konzeptionelle Empfehlung zur Quartiersvernetzung muss deshalb auf der Erkenntnis beruhen, dass die Systemintegration auf Quartiersebene einen eigenständigen Planungs- und Bewertungsmaßstab darstellt, der über die reine Addition gebäudebezogener Maßnahmen hinausgeht.

Ausgangspunkt einer solchen Quartiersvernetzung ist die belastbare Beschreibung des energetischen Ist-Zustands. Im Projekt wurde hierzu ein räumlich und zeitlich aufgelöster Datensatz aufgebaut, der Wärme-, Strom- und Warmwasserbedarfe gebäudeweise erfasst und über GIS im Quartier verortet. In Kapitel II.6.3.1.1.3 wurde gezeigt, dass die Margarethenhöhe energetisch nicht als homogener Siedlungskörper zu verstehen ist, sondern als fein ausdifferenziertes Lastsystem mit räumlich unterschiedlichen Bedarfsstrukturen. Zusätzlich wurde deutlich, dass die Quartiersvernetzung nicht nur auf Jahresbilanzen reagieren darf, sondern auf zeitlich hoch aufgelöste Lastdynamiken ausgelegt werden muss. Eine zentrale Empfehlung für die Weiterentwicklung des Quartiers lautet daher, die Vernetzung stets auf einer räumlich und zeitlich aufgelösten Lastanalyse aufzubauen. Ohne diese Grundlage besteht die Gefahr, dass Erzeugung, Speicher und Netzanschlusspunkte weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll dimensioniert werden.

Hinzu kommt, dass die energetische Quartiersvernetzung nur dann belastbar geplant werden kann, wenn auch die elektrische Infrastruktur des Quartiers modellhaft erfasst wird. Im Projekt wurden deshalb die Standorte der Umspannstationen durch Ortsbegehung identifiziert und die angenommenen Stromleitungsverläufe in das Modell integriert (siehe Kapitel II.6.3.1.2). Das Quartier wurde nicht nur als Summe von Gebäuden, sondern als gegliedertes Verteilnetz mit Teilbereichen und Netzknoten betrachtet. Für die konzeptionelle Weiterentwicklung folgt daraus die klare Empfehlung, Quartiersvernetzung nicht ausschließlich als digitale Kommunikation zwischen Gebäuden zu verstehen, sondern immer auch als netzräumliche Kopplung von Lasten und Erzeugern. Gerade bei weiterem Ausbau von Photovoltaik, Wärmepumpen und Speichern ist die Kenntnis der elektrischen Teilnetzstruktur Voraussetzung dafür, Residuallasten, Leistungsspitzen und netzdienliche Potenziale realistisch zu bewerten.

Die im Projekt entwickelte Quartiersmodellierung liefert hierfür den methodischen Kern. In Kapitel II.6.3.1.2 wurde ein Arbeitsansatz etabliert, der die reale Komplexität des Quartiers in eine simulationsfähige Modellstruktur überführt. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Clusterbildung der Gebäude. Genau an dieser Stelle setzt auch AP 3.7.2 an: Die Gebäude des Quartiers wurden bereits in Cluster eingeteilt, innerhalb derer sich die Gebäude hinsichtlich des Energiebedarfs möglichst ähnlich sind, und dass durch die Einteilung eines anderen Quartiers in diese Cluster die Ergebnisse des Projekts grundsätzlich auf dieses Quartier übertragen werden können. Die wichtigste übertragbare Erkenntnis für die Quartiersvernetzung liegt damit nicht in einer festen technischen Standardlösung, sondern in einer clusterbasierten Modellierungs- und Übertragungslogik.

Für die Margarethenhöhe selbst ergibt sich daraus die Empfehlung, die zukünftige Quartiersvernetzung auf einem mehrskaligen Modellansatz weiterzuentwickeln. Auf der ersten Ebene sind die Gebäude nach energetischer Ähnlichkeit, Nutzungsstruktur und Anschlussbedingungen zu clustern. Auf der zweiten Ebene sind diese Cluster in ein georeferenziertes Netzmodell einzubinden. Auf der dritten Ebene sind technologiespezifische Ausbauannahmen, etwa zu Photovoltaik, Speichern, Wärmepumpen oder KWK, szenarienbasiert zu hinterlegen. Dieser Ansatz wurde im Projekt bereits vorbereitet, etwa über Abbildung 241 und Abbildung 244. Die konzeptionelle Weiterentwicklung des Quartiers sollte deshalb nicht in Form singulärer Maßnahmenlisten erfolgen, sondern als szenariengestützte Fortschreibung des Quartiersmodells. Nur so lässt sich bewerten, wie sich unterschiedliche Technologiekombinationen auf Residuallasten, Netzbelastung und Eigenversorgungsgrade auswirken.

Ein weiterer zentraler Erkenntnisgewinn des Projekts betrifft die Regelungsebene der Quartiersvernetzung. Bereits in Teilprojekt 2 wurde deutlich, dass digitale Komponenten zur Erfassung, Visualisierung und Steuerung von Energieflüssen als Grundlage für modellprädiktive Regelstrategien dienen sollen. In Teilprojekt 3 wurde dies weitergeführt, indem aus dem Quartiersmodell Untermodelle für Regelungsuntersuchungen abgeleitet wurden. In Kapitel II.6.3.1.3.7 konnte gezeigt werden, dass eine modellprädiktive Regelung prinzipiell geeignet ist, den externen Strombezug zu reduzieren und Leistungsspitzen im Unterquartier zu glätten. Für die konzeptionelle Empfehlung folgt daraus, dass Quartiersvernetzung nicht bei der Datenerfassung stehen bleiben darf. Ihr eigentlicher Mehrwert entsteht erst dann, wenn die vorhandenen Daten in prädiktive, koordinierte Betriebsstrategien überführt werden, die Erzeugung, Speicher und flexible Lasten gemeinsam optimieren.

Gleichzeitig zeigt das Projekt, dass die Quartiersvernetzung nicht monotecnologisch gedacht werden sollte. In AP 3.2 wurde für ein Teilnetz ein KWK-Szenario mit BHKW und Nahwärmenetz untersucht; dort wurde bereits deutlich, dass stromorientierte Fahrweisen, thermische Speicher und intelligente Regelung gemeinsam betrachtet werden müssen. In AP 3.3 und AP 3.4 wurde die Einbindung von Photovoltaik und Speichern in das Netzmodell vorbereitet. In AP 3.5 wurde schließlich die Betriebsführung unterschiedlicher Komponenten im Unterquartier regelungstechnisch gekoppelt. Daraus ergibt sich eine zentrale Empfehlung für die Weiterentwicklung der Margarethenhöhe: Die Quartiersvernetzung sollte technologieoffen bleiben, aber immer entlang einer gemeinsamen Betriebslogik entwickelt werden. Nicht die einzelne Technologie ist maßgeblich, sondern deren Beitrag zur Reduktion von Residuallasten, zur Erhöhung des Eigenverbrauchs, zur Stabilisierung der Netze und zur Begrenzung externer Leistungsbezüge.

Für die Übertragbarkeit auf andere Quartiere ergibt sich daraus ein klarer methodischer Rahmen. Es sind zwei zusätzliche Merkmale zu benennen, die neben der energetischen Clusterzuordnung zu berücksichtigen sind, nämlich die Eignung eines Gebäudes für Photovoltaik und die verfügbare Fläche für Geothermie. Diese Ergänzung ist für die Übertragung besonders wichtig, weil Quar-

tiersvernetzung nicht allein aus dem Energiebedarf der Gebäude abgeleitet werden kann. Übertragbar ist vielmehr ein mehrdimensionaler Schlüssel, der mindestens Gebäudetypologie, energetisches Cluster, PV-Eignung, Flächenverfügbarkeit für Geothermie, Netzanschlussituation und Vernetzbarkeit mit benachbarten Gebäuden umfasst. Andere Quartiere können, die in EnQM entwickelten Ergebnisse dann nutzen, wenn sie ihre Gebäude zunächst nach dieser Logik klassifizieren und erst anschließend passende Erzeuger-, Speicher- und Regelungskonzepte zuordnen. Die wesentliche übertragbare Erkenntnis des Projekts besteht also in der Entwicklung eines Übertragungsschlüssels auf Basis energetischer und infrastruktureller Merkmale, nicht in der unmittelbaren Übernahme eines identischen Technologiemixes.

Insgesamt ergibt sich daraus folgende konzeptionelle Empfehlung zur Weiterentwicklung des Quartiers in Bezug auf Quartiersvernetzung: Die Margarethenhöhe sollte nicht über eine zentral vorgegebene Einzellösung weiterentwickelt werden, sondern über ein clusterbasiertes, netzräumlich verortetes und regelungstechnisch gekoppeltes Quartiersmodell, das schrittweise um reale Technologie- und Messdaten ergänzt wird. Die technische Vernetzung sollte dabei auf einer robusten Kommunikations- und Messinfrastruktur aufbauen, wie sie im Projekt mit Smart Metern, Gebäudehubs und Serveranbindung bereits angelegt wurde, und anschließend in prädiktive Regelstrategien überführt werden. Für andere Quartiere ist insbesondere die Methodik der Quartiersabbildung, Clusterbildung, Szenariomodellierung und prädiktiven Regelung übertragbar. Die eigentliche Lehre aus EnQM besteht somit darin, dass Quartiersvernetzung nicht als nachgelagerte Ergänzung einzelner Sanierungsmaßnahmen verstanden werden darf, sondern als eigenständiges konzeptionelles Rückgrat eines skalierbaren Transformationspfades für den denkmalgeschützten Bestand.

Die im Verbundvorhaben EnQM gewonnenen Erkenntnisse zur Photovoltaik zeigen, dass eine denkmalgerechte PV-Integration im Quartier grundsätzlich ein relevantes Entwicklungspotenzial besitzt, ihre praktische Umsetzbarkeit jedoch wesentlich von der Bauteilqualität, der elektrischen Verschaltung, der Verschattungssituation, der Dauerhaftigkeit der Laminierung und der Einbaulogistik am Objekt abhängt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Installation, insbesondere die Kabelführung und die Verlegung der Verrohrung, von der Margarethe Krupp-Stiftung gemeinsam mit den ausführenden Unternehmen geplant wurde und eine abschließende Analyse hierzu erst nach dem Einbau im Objekt möglich ist. Die nachfolgende Empfehlung ist deshalb als konzeptionell belastbare Zwischenbewertung der bisher untersuchten PV-Dachsteinlösung zu verstehen.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand der am IAS evaluierte, zum Berichtszeitpunkt verfügbare Prototyp eines photovoltaisch aktivierten Dachsteins, der als Typ-2 bezeichnet wird. Abbildung 261 dokumentiert diesen Prototypen und macht zugleich deutlich, dass dessen Farbgebung noch nicht dem Endprodukt entspricht. Für die konzeptionelle Bewertung ist dies wichtig, weil die Eignung für den denkmalgeschützten Bestand nicht nur von der elektrischen Leistungsfähigkeit, sondern auch von der gestalterischen Einpassung abhängt. Der Schlussbericht bewertet damit die PV-Lösung ausdrücklich nicht als abstraktes Modul, sondern als dachintegrierten Baustein, der sich in Erscheinungsbild und Geometrie an die Anforderungen des Quartiers anpassen muss.



Abbildung 261: Dachstein-Prototyp – Typ-2

Die technische Untersuchung wurde in einem systematischen Vergleichsaufbau durchgeführt. Der Teststand umfasste 10 Dachsteine vom Typ-2 sowie zum direkten Vergleich 10 flache Solar-dachziegel der Firma Autarq als Referenz. Entsprechend der Projektidee wurden jeweils zwei Typ-2-Dachsteine in Serie verschaltet und diese Zweierverbünde wiederum parallelgeschaltet. Der Aufbau ist in Abbildung 262 dargestellt. Jeder Dachstein besteht aus einer Parallelschaltung von fünf Solarstreifen, wobei jeder Streifen aus 20 in Serie geschalteten Einzelzellen besteht. Insgesamt enthält ein Dachstein damit 100 Zellen mit Abmessungen von 13 mm × 26 mm, was zu einem elektrischen Flächenanteil von rund 50 % bezogen auf die Dachfläche führt. Dies ist deshalb zentral, weil bereits diese konstruktive Auslegung den späteren Wirkungsgrad und die Empfindlichkeit gegenüber Verschattung wesentlich mitbestimmt.



Abbildung 262: Messaufbau mit Typ-2 an der RWTH Aachen

Ein erstes wesentliches Ergebnis der Untersuchungen besteht darin, dass die auf dem Teststand erzielte Ausgangsleistung der zehn Dachsteine deutlich unter der zuvor prognostizierten Nennleistung lag. Hierfür sind zwei wesentliche Ursachen zu benennen. Erstens erwies sich der für die serielle Verbindung verwendete, vorkonfektionierte Kabelbaum der Firma Autarq als nicht hinreichend kontaktsicher. Zweitens zeigte sich eine erhebliche Streuung der elektrischen Eigenschaften der einzelnen Dachsteine. Der Einfluss der Kontaktprobleme wird in Abbildung 263 dokumentiert. Im rot markierten Bereich der Grafik geht die Leistung ausschließlich beim Typ-2-Messfeld schlagartig zurück und dass dieser Fehler eindeutig auf den Kabelbaum zurückgeführt werden konnte. Für die konzeptionelle Weiterentwicklung des Quartiers folgt daraus, dass die elektrische Kontaktierung kein nachgeordnetes Detail ist, sondern ein zentraler Erfolgsfaktor der dachintegrierten PV-Lösung. Eine serielle Dachsteinlösung ist nur dann betriebssicher übertragbar, wenn die Kontaktierung montagefreundlich, dauerhaft stabil und tolerant gegenüber Bautoleranzen ausgeführt wird.



Abbildung 263: Vergleichsmessung mit Leistungseinbruch durch Kontaktprobleme im Kabelbaum

Die zweite wesentliche Schwachstelle betrifft die Streuung des Kurzschlussstroms der einzelnen PV-Dachsteine. Diese Streuung hat gerade bei der gewählten Serienschaltung gravierende Auswirkungen auf die Gesamtleistung, da in jedem Zweierverbund stets der Dachstein mit dem geringeren Strom die Modulleistung begrenzt. Bei der Messreihe aller vorhandenen Prototypen lag die Variation des Kurzschlussstroms bei bis zu **-37 %**, was unmittelbar auch zu einer entsprechend geringeren entnehmbaren elektrischen Leistung führt. Die Messwerte sind in

Tabelle 53 zusammengefasst. Selbst nach der Auswahl der 10 besten Dachsteine aus insgesamt 28 Exemplaren verblieben noch Unterschiede von **-18 %**. Aus diesem Grund wurden die Dachsteine zusätzlich paarweise sortiert, um das Potenzial der PV-Lamine in der Serienschaltung besser auszunutzen. Für die Übertragbarkeit der Erkenntnisse bedeutet dies, dass eine dachintegrierte PV-Lösung dieser Art nur dann sinnvoll in größerem Maßstab eingesetzt werden kann, wenn die Serienstreuung der elektrischen Kennwerte deutlich reduziert oder die Leistungselektronik so ausgelegt wird, dass diese Unterschiede beherrscht werden können.

Tabelle 53: Typ-2 Kurzschlussströme

Dachstein Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ISC [mA]	138	190	237	267	287	295	324	343	351	361	380	386	402	407
Dachstein Nr.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
ISC [mA]	408	413	424	425	435	453	457	464	471	480	491	503	526	529

Die energetische Hauptbewertung des Typ-2-Prototyps ergibt sich aus dem direkten Vergleich mit dem Referenzziegel. Die Vermessung eines einzelnen Dachsteins des Typs 2, gemittelt über einen Verbund von zufällig gewählten Exemplaren, bei 1000 W/m^2 solarer Einstrahlung ergibt eine elektrische Leistung von $2,6 \text{ W}$. Die resultierende Tagesauswertung ist in Abbildung 264 dargestellt. Daraus ergibt sich für den Typ-2-Prototyp eine normierte elektrische Leistung von 240 Wh/m^2 , während die Referenz bei 670 Wh/m^2 liegt. Diese Differenz ist für die Schlussfassung von besonderer Bedeutung, weil sie die Leistungsfähigkeit des untersuchten Prototyps im direk-

ten Vergleich quantitativ einordnet. Zudem zeigt sich eine zeitlich verschobene Leistungskurve des Typ-2 gegenüber dem flachen Referenzziegel: Am Morgen steigt die Leistung deutlich langsamer an, das Leistungsmaximum wird später erreicht. Daraus folgt für die Weiterentwicklung des Quartiers, dass die Verwendung gewellter, denkmalgerechter PV-Dachsteine energetisch nur dann sinnvoll ist, wenn die geometriebedingten Verluste bereits im Entwurf berücksichtigt und konstruktiv minimiert werden.

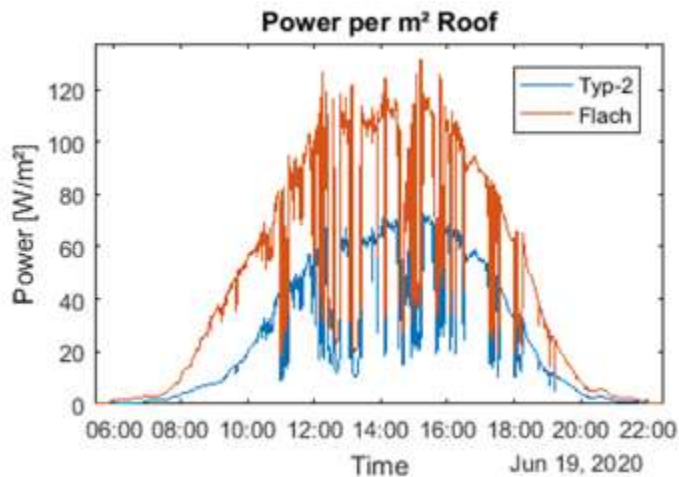


Abbildung 264: Tagesmessung zwischen Typ-2 und Autarq-Produkt

Die Ursache dieser Ertragsminderung wird vor allem in der Eigenverschattung der gewellten Dachsteinform gesehen. Abbildung 265 zeigt den Messstand am Morgen bei wolkenlosem Himmel und aufgehender Sonne. Die einzelnen Streifen des PV-Laminats werden unvermeidbar verschattet und dies wirkt sich näherungsweise linear auf die Gesamtleistung aus. Schwerwiegender ist jedoch die horizontale Totalverschattung einzelner Dachsteine an den oberen Kanten, verursacht durch die jeweils darüberliegende Dachsteinreihe. In diesem Fall sinkt die Leistung des betroffenen Dachsteins auf nahezu 0 W ab. Daraus kann eine konkrete Empfehlung abgeleitet werden, nämlich ein kleineres Laminat, damit die Dachsteinanordnung nicht zu einer Vollverschattung einzelner aktiver Bereiche führt und zugleich die Laminatkosten reduziert werden können. Für die konzeptionelle Weiterentwicklung der PV-Strategie im Quartier ist dies ein zentrales Ergebnis: Übertragbar ist nicht der vorliegende Prototyp in seiner bestehenden Geometrie, sondern die Erkenntnis, dass eine denkmalgerechte PV-Lösung geometrisch so entworfen werden muss, dass Vollverschattung innerhalb des Dachsteinverbunds vermieden wird.

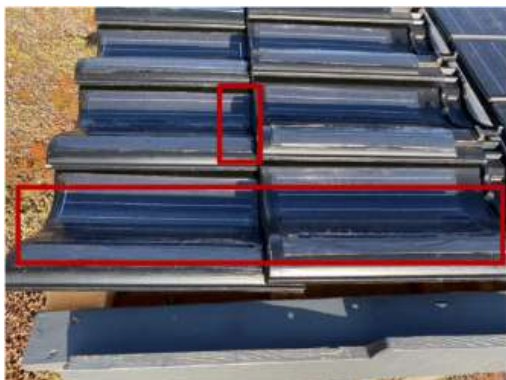


Abbildung 265: Eigenverschattung Typ-2: Eingebaut im Messstand

Ein weiterer kritischer Befund betrifft die Dauerhaftigkeit der Laminierung. Bereits nach wenigen Monaten auf dem Teststand wurde am Typ-2-Prototyp Blasenbildung beobachtet. Diese Schäden sind in Abbildung 266 und Abbildung 267 dokumentiert. Es werden zwei Erscheinungsformen

unterschieden: Zum einen Luft einschüsse unter dem Laminat, zum anderen Blasen, die durch Luft einschüsse zwischen Folie und Laminat entstehen. Als Folgen werden eine deutlich reduzierte Haltbarkeit, eine Degradation der elektrischen Parameter sowie zusätzliche unerwünschte Reflexionen genannt. Für den praktischen Dacheinsatz werden solche Fehler in der Laminierung ausdrücklich als nicht tolerierbar bewertet. Die eigentliche Übertragbarkeitsgrenze der untersuchten PV-Lösung liegt weniger in der Idee der dachintegrierten Photovoltaik als in der noch nicht erreichten dauerhaften material- und laminattechnischen Beherrschung des Prototyps.



Abbildung 266: Typ-2 Blasenbildung unter Laminat



Abbildung 267: Typ-2 Blasenbildung in Laminierung

Aus der Zusammenschau dieser Befunde kann eine klare Schlussfolgerung formuliert werden: Der Dachstein Typ-2 ist in der jetzigen Art nicht geeignet, in größerer Stückzahl auf der Margarethenhöhe eingebracht zu werden. Die beschriebenen Mängel an den zentralen Eigenschaften des Systems, insbesondere bei Laminierung und elektrischem Anschluss, erlauben keine Nutzungsempfehlung. Auch ist davon auszugehen, dass die Lamine bereits beim Einbau geschädigt werden könnten. Als Konsequenz wurde ein neuer Dachstein produziert, bei unverändertem optischem Erscheinungsbild, aber mit überarbeiteter technischer Ausführung. Die während der Projektlaufzeit entwickelte PV-Lösung ist konzeptionell vielversprechend, der vorliegende Typ-2-Prototyp ist jedoch noch nicht anwendungsreif.

Für die Weiterentwicklung des Quartiers ergibt sich daraus eine klare konzeptionelle Empfehlung. Die Integration photovoltaischer Dachsteine in der Margarethenhöhe sollte weiterverfolgt werden, jedoch nicht auf Basis des derzeitigen Typ-2-Prototyps, sondern nur auf Grundlage einer technisch überarbeiteten Generation, bei der mindestens vier Punkte nachweislich gelöst sind: erstens eine zuverlässige elektrische Kontaktierung, zweitens eine deutlich geringere Streuung der elektrischen Kennwerte, drittens eine geometrisch optimierte Laminatgestaltung zur Reduk-

tion der Eigenverschattung und viertens eine dauerhafte, fehlerfreie Laminierung. Photovoltaik im denkmalgeschützten Quartier ist damit nicht grundsätzlich auszuschließen, sondern als weiter zu entwickelnde Option einzuordnen, deren Erfolg maßgeblich von der industriellen Reife der dachintegrierten Komponente abhängt. Die konzeptionelle Empfehlung lautet daher, PV im Quartier als perspektivischen Baustein eines LowEx-Gesamtsystems vorzusehen, seine flächige Umsetzung jedoch erst nach erfolgreicher technischer Requalifizierung des Dachsteins zu planen.

Auch für die Übertragbarkeit auf andere Quartiere ergibt sich eine differenzierte Schlussfolgerung. Übertragbar ist in erster Linie die Methodik der Bewertung: Ein denkmalgerechter PV-Baustein muss nicht nur auf seinen Jahresertrag hin untersucht werden, sondern immer zugleich hinsichtlich Formgeometrie, Eigenverschattung, elektrischer Verschaltung, Montage- und Kontaktierungssicherheit, Material- und Laminatbeständigkeit sowie optischer Einpassung. Andere Quartiere mit vergleichbaren Anforderungen an das Erscheinungsbild können von EnQM daher insbesondere hinsichtlich der Prüf- und Entwicklungskriterien profitieren. Nicht übertragbar ist demgegenüber eine direkte Anwendung des vorliegenden Typ-2-Prototyps. Die zentrale Aussage aus AP 3.7.3 besteht darin, dass eine dachintegrierte PV-Lösung im denkmalgeschützten Bestand nur dann tragfähig ist, wenn gestalterische Integrationsfähigkeit und technische Dauerhaftigkeit gleichermaßen nachgewiesen sind.

II.6.4 Teilprojekt 4 – Umsetzung in der Siedlung Margarethenhöhe

AP 4.1 übernimmt innerhalb von Teilprojekt 4 die Aufgabe, die in den Teilprojekten 1 bis 3 entwickelten Sanierungskonzepte in eine konkrete Umsetzungsplanung für die Demonstratorobjekte zu überführen. Ziel dieses Arbeitspakets war die Planung und Ausschreibung der im Projekt untersuchten gebäudebezogenen Sanierungsmaßnahmen für bis zu fünf Objekte in der Siedlung. Die vorgesehenen Arbeitsschritte umfassten das Identifizieren geeigneter Beispielobjekte, das Abstimmen und Planen der Maßnahmen des jeweiligen Sanierungskonzeptes, das Abstimmen der Maßnahmen mit der Denkmalpflege, die Ausschreibung und Vergabe der mit den Maßnahmen verbundenen Arbeiten sowie die technische Koordination und Bauüberwachung vor Ort. AP 4.1 ist damit das zentrale Bindeglied zwischen den zuvor entwickelten Konzepten und der realen baulichen Umsetzung im Quartier.

Die Auswahl der Demonstratorobjekte erfolgte nicht allein aus technischer Sicht, sondern war in hohem Maß durch die reale Verfügbarkeit der Wohnungen und Häuser bestimmt. Aufgrund von Mieterwechseln standen für die Sanierungsmaßnahmen schließlich die Objekte Ginsterweg 35, Daheim 3B, Sommerburgstraße 35, Sommerburgstraße 105 und Stensstraße 24 zur Verfügung. Diese fünf Objekte bilden damit die praktische Grundlage der Umsetzungsphase. Die objektspezifische Zuordnung der vorgesehenen Maßnahmen ist in Tabelle 57 zusammengestellt.

Ein wesentliches Ergebnis des Arbeitspakets ist die Erkenntnis, dass die Überführung der entwickelten Sanierungskonzepte in die Ausführungsplanung im denkmalgeschützten Bestand erheblich durch denkmalrechtliche Abstimmungsprozesse geprägt wird. Alle durchzuführenden Maßnahmen wurden mit der Denkmalpflege abgestimmt und dass bereits diese Abstimmung zu zeitlichen Verschiebungen führte. Insbesondere die ersten denkmalrechtlichen Anträge waren mit hohen Anforderungen der Denkmalpflege an möglicherweise erforderliche individuelle Lösungen verbunden; die Genehmigung nahm mehr als sechs Monate in Anspruch. Für die Schlussdarstellung ist dies besonders wichtig, weil damit deutlich wird, dass AP 4.1 nicht nur technische Planung, sondern in erheblichem Umfang auch Genehmigungsmanagement und denkmalfachliche Verhandlungsarbeit umfasst.

Durch Erfahrung konnte diese Aussage weiter konkretisiert werden, indem deutlich wurde, dass für alle ausgewählten Objekte zusätzlich zum üblichen denkmalrechtlichen Antrag der Margarethe Krupp-Stiftung eine ausführliche Beschreibung der im Forschungsprojekt vorgesehenen Maßnahmen erstellt werden musste. Diese zusätzliche Unterlage wurde jeweils separat von der Denkmalbehörde geprüft und genehmigt. AP 4.1 zeigt damit sehr klar, dass innovative Sanierungsmaßnahmen im denkmalgeschützten Bestand nicht einfach an die reguläre Instandsetzungspraxis angehängt werden können. Vielmehr war für jedes Objekt eine projektspezifische Übersetzung der Forschungsmaßnahmen in eine denkmalrechtlich prüffähige Form erforderlich. Genau hierin liegt eine wesentliche planerische Leistung dieses Arbeitspakets.

Exemplarisch wird diese planerische Verdichtung am Einfamilienhaus Sommerburgstraße 35 dargestellt. Dieses Objekt wird nicht nur als Demonstrator, sondern ausdrücklich als Musterfall für den denkmalpflegerischen Antrag herangezogen. Bereits die Bestands- und Lageeinordnung wird durch Abbildung 268 und Abbildung 269 dokumentiert. Ergänzend zeigen Abbildung 270 und Abbildung 271, dass die Planung nicht auf Einzelkomponenten beschränkt blieb, sondern den Gebäudegrundriss, die Nutzungsstruktur und mögliche Anpassungen im Innenraum mit umfasste. Das Objekt Sommerburgstraße 35 dient als planerisches Referenzobjekt, an dem der Schritt von der konzeptionellen Empfehlung zur genehmigungs- und ausführungsreifen Objektplanung nachvollzogen werden kann.



Abbildung 268: Vorderansicht Sommerburgstraße 35



Abbildung 269: Lage des Objektes Sommerburgstraße 35 im Katasterplan

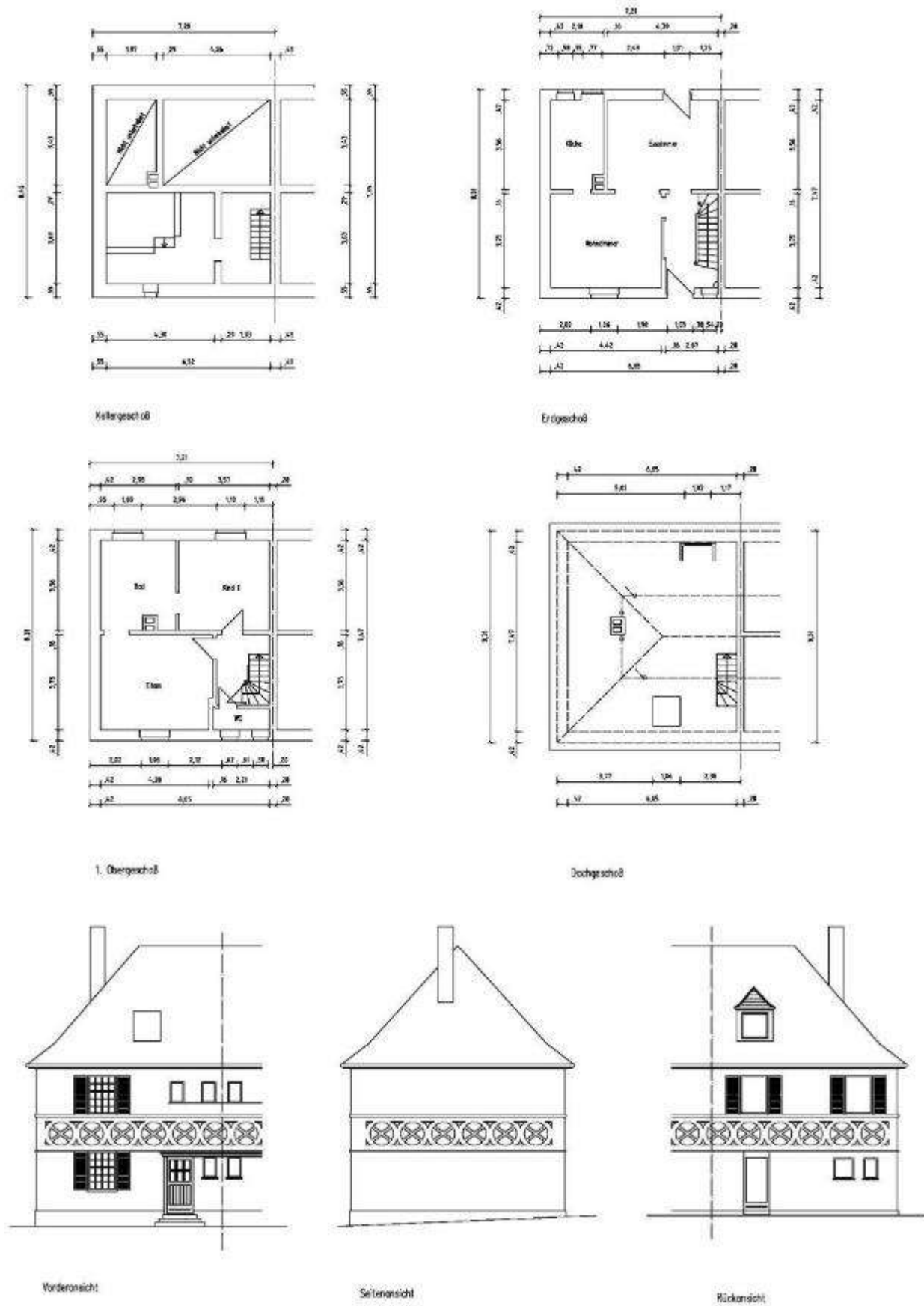


Abbildung 270: Bestandplan Sommerburgstraße 35

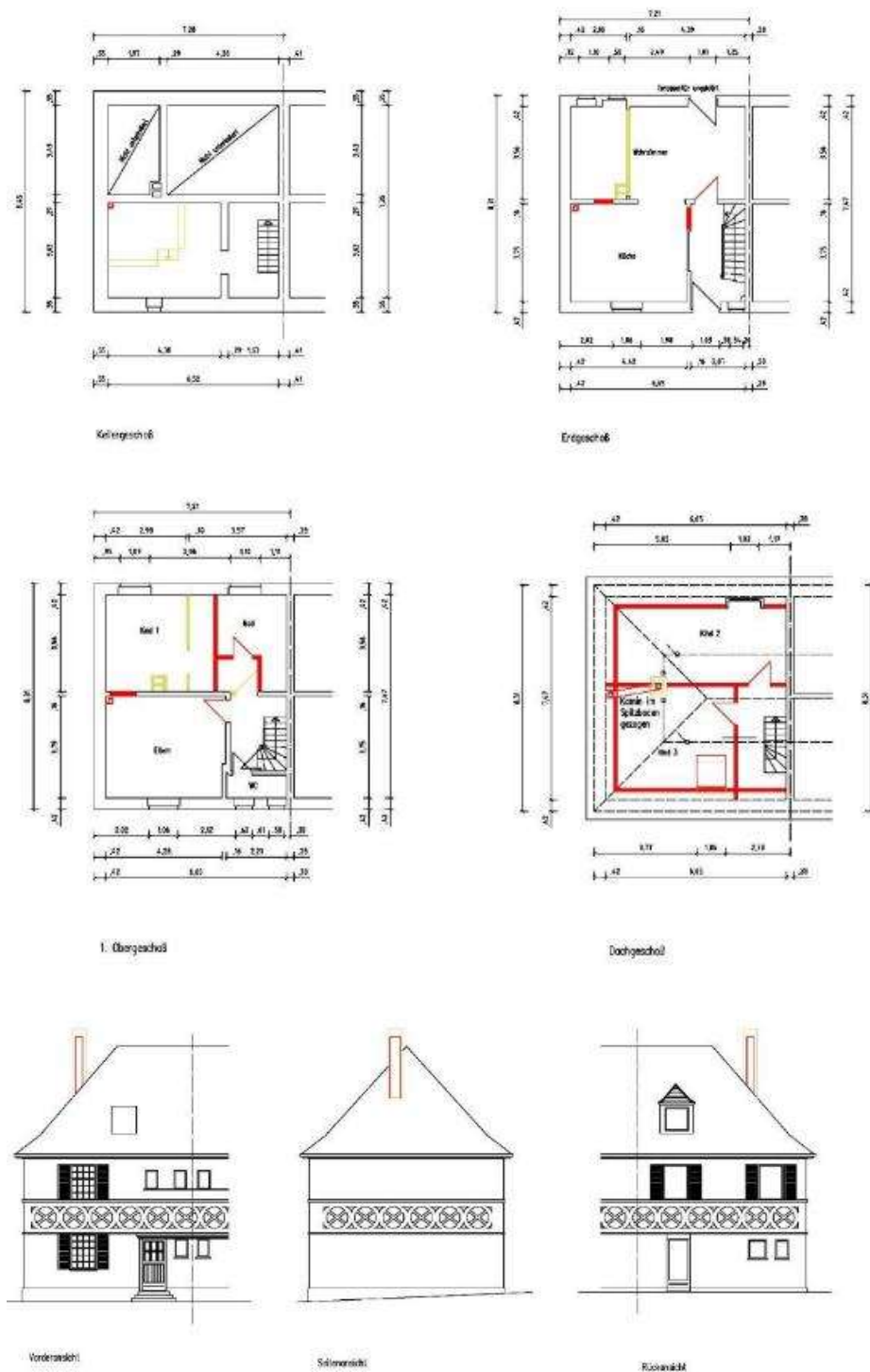


Abbildung 271: Vorplanung bzgl. Grundrissänderung (gelb = Abriss, rot = Neu)

Die inhaltliche Tiefe dieser Planung wird darüber hinaus über eine ganze Gruppe objektspezifischer Abbildungen und Tabellen dokumentiert. Abbildung 272 bündelt die aus den vorangegangenen Teilprojekten abgeleiteten Maßnahmenempfehlungen. Mit Abbildung 273, Abbildung 274 und Abbildung 275 wird die hüll- und detailbezogene Planung vertieft. Die daraus resultierenden Aufbauhöhen und konstruktiven Randbedingungen werden in Tabelle 54 und Tabelle 55 ergänzt. Zusammen zeigen diese Darstellungen, dass AP 4.1 die Sanierungsplanung auf der Ebene des konkreten Bauteilaufbaus und der Anschlussdetails ausarbeitet und dabei sowohl bauphysikalische als auch denkmalpflegerische Anforderungen in die Ausführungsplanung überführt.

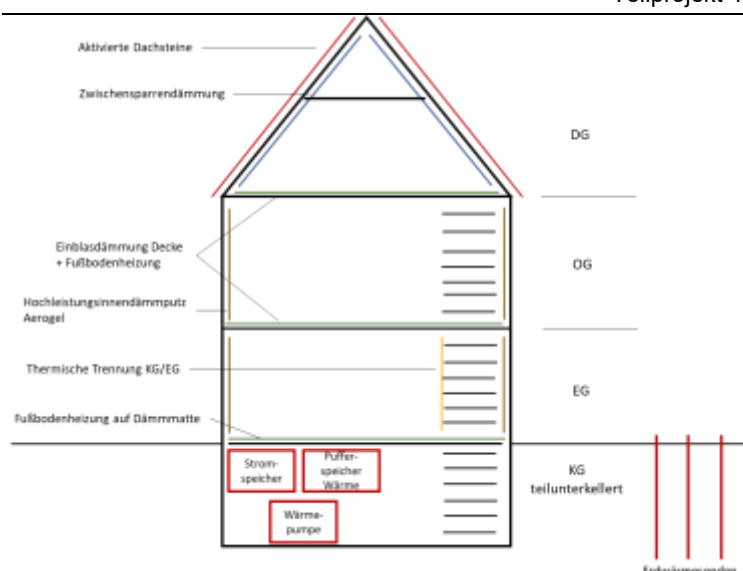


Abbildung 272: Empfohlene Maßnahmen seitens der Projektpartner – Sommerburgstraße 35

Produktbeschreibung

Der Fixit 222 Aerogel Hochleistungsdämmputz ist die Innovation im Bereich von Dämmputzen. Durch die Verwendung von Aerogel-Granulat als dämmenden Zuschlagstoff erreicht der Fixit 222 eine Wärmeleitfähigkeit, welche um ein vielfaches niedriger ist als bei anderen marktüblichen Dämmputzen. Altbauten sowie historische und unter Denkmalschutz stehende Objekte können damit energetisch saniert werden, ohne dass die originale Wandstruktur verloren geht. Rundungen und Vertiefungen können originalgetreu nachgebildet und Unebenheiten millimetergenau ausgefüllt werden. Informationen über technische Produkteigenschaften sind in den technischen Merkblättern von Fixit zu finden.

Zusammensetzung des Produktes

Rohstoffe:	Calciumhydroxid	25 % – 50 %
	Dicalciumsilikat	10 % – 25 %
	Gebrannte natürliche Tonerde	2,5 % – 10 %
	Weisszement	2,5 % – 10 %
	Kalkstein	≤ 2,5 %
	Silica, [(trimethylsilyloxy)-modifiziert	25 % – 50 %

Rahmen der Ökobilanz

Als Datenbasis für die Ökobilanz wurden spezifische Daten der Firma Fixit AG aus dem Jahr 2013 herangezogen und mit durchschnittlichen Daten für die eingesetzten Rohstoffe aus der Datenbank Ecoinvent V2.2 ergänzt. Eine Ausnahme bilden die Produktionsdaten des Aerogels, welche aus Relevanzgründen direkt beim Hersteller erhoben wurden.

Als deklarierte Einheit wurde 1 kg Produkt gewählt.

In diesem EPD sind die Resultate für die Herstellungsphase inklusive Verpackung des Produktes unter Berücksichtigung aller vorangehenden Prozesse wie Rohstoffgewinnung und Transporte dokumentiert („cradle to gate“, Nutzungsphase und Entsorgung wurden nicht bilanziert). Dies entspricht den Anforderungen nach EN15804 an ein EPD für das Produktstadium (Phasen A1–A3).

Mit der Ökobilanz werden die Auswirkungen der relevanten Stoff- und Energieströme auf die Umwelt erfasst. Die ökologische Bewertung wurde nach der ISO Norm 14040 ff. durchgeführt. Bei der Bewertung wurden die gemäß der Erfahrung der Carbotech AG relevantesten Wirkungskategorien ausgewählt. Eine ausführliche Dokumentation zur Ökobilanz mit Resultaten zu allen Lebenszyklusphasen ist im separaten Bericht „Ökobilanz des Fixit 222 Aerogel Hochleistungsdämmputz“ zu finden.

Alle Inputdaten wurden von der Carbotech AG eingehend auf Plausibilität überprüft. Damit kann die Carbotech AG gewährleisten, dass die Erstellung der Umwelterklärung nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt worden ist.

Ergebnisse EPD „cradle to gate“ (A1–A3 nach EN15804)

Wirkungskategorie	Einheit	Wert pro kg	Referenzangabe Methoden
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äquiv.	4,25 ± 11 %	ILCD 2011 aktualisiert (IPCC 2007 zu 2013)
Kumulierter Energieaufwand	MJ-Äquiv.	66,1 ± 13 %	Ecoinvent 2.0
Säurebildungspotential	mol H ⁺ -Äquiv.	0,0135 ± 20 %	ILCD 2011
Eutrophierung Boden	mol N-Äquiv.	0,0308 ± 19 %	ILCD 2011
Eutrophierung Süßwasser	kg P-Äquiv.	0,00018 ± 53 %	ILCD 2011
Eutrophierung Meer	kg N-Äquiv.	0,00305 ± 16 %	ILCD 2011
Ozonbildungspotential	kg NMVOC-Äquiv.	0,00870 ± 19 %	ILCD 2011

Energetische Rückzahldauer

Die energetische Rückzahldauer (Dämmnutzen im Vergleich mit der Grauen Energie des Dämmstoffes) beträgt bei einer Dämmstärke von 5 cm auf einer Standard-Backsteinmauer etwa 2,9 Jahre.

Abbildung 273: AdvancedEPD für Aerogel-Dämmputz



Abbildung 274: Schichtaufbau des Dämmsystems

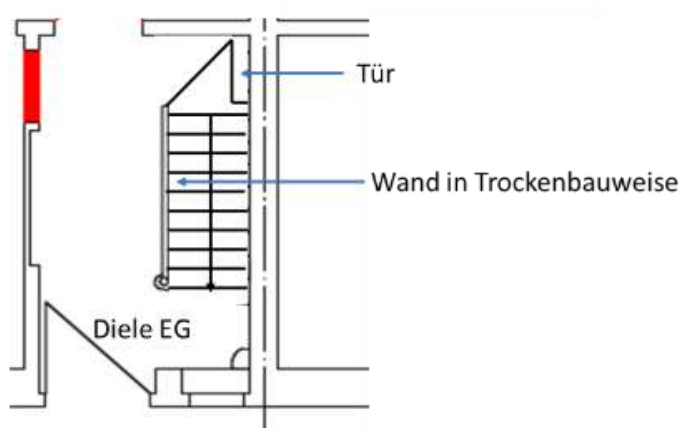


Abbildung 275: Thermischer Abschluss EG zu KG in Trockenbauweise

Tabelle 54: Wärmedämmung des Systems – Mindest-Wärmeleitwiderstände der Dämmschichten unter den Leitungen des Fußbodenheiz-bzw. Kühlsystems ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

	Darunter befindlicher oder benachbarter beheizter Raum	Unbeheizter oder in Abständen beheizter darunter befindlicher, benachbarter oder direkt auf dem Erdreich befindlicher Raum ^a	Außenlufttemperatur im darunter befindlichen oder danebenliegenden Bereich		
			Auslegungs- außen- temperatur $\vartheta_d \geq 0^\circ\text{C}$	Auslegungs- außen- temperatur $0^\circ\text{C} > \vartheta_d \geq -5^\circ\text{C}$	Auslegungs- außen- temperatur $-5^\circ\text{C} > \vartheta_d \geq -15^\circ\text{C}$
Wärmeleit- widerstand $R_{\lambda, \text{ins}}$	0,75	1,25	1,25	1,50	2,00
^a Bei einem Grundwasserspiegel ≤ 5 m unterhalb des tragenden Untergrundes sollte dieser Wert erhöht werden.					

Tabelle 55: Aufbauhöhen im Bestand und mit Fußbodenheizung

	Bestand	mit Fußbodenheizung
Aufbau unterkell- ter Bereich	Kappendecke/Betonboden 55 mm Estrich 18 mm Mörtel 12 mm Fliese Gesamthöhe = 85 mm	Neuaufbau ab Kappendecke/Betonboden 30 mm Dämmung PUR ($\lambda = 0,025 \text{ W/mK}$) 40 mm Fußbodenheizung 15 mm Fliese Gesamthöhe = 85 mm
Aufbau nicht unter- kellter Bereich	Unterbau Balkenlage 24 mm Dielenboden	Ersetzen Balkenlage und Dielenboden durch Beton- boden – Niveau unterkellter Bereich 30 mm Dämmung PUR ($\lambda = 0,025 \text{ W/mK}$) 40 mm Fußbodenheizung 15 mm Fliese Gesamthöhe = 85 mm
OG	Unterbau Balkenlage 24 mm Dielenboden Gesamthöhe = 24 mm	24 mm Dielenboden 12 mm Fließendämmplatte 22 mm Fußbodenheizung Gesamthöhe = 58 mm
DG	Unterbau Balkenlage 40 mm Terrassenboden Gesamthöhe = 40 mm	40 mm Boden 12 mm Fließendämmplatte 22 mm Fußbodenheizung Gesamthöhe = 74 mm

Besonders deutlich wird dies im Bereich der geplanten Fußbodenheizung und der damit verbundenen Auswirkungen auf vorhandene Niveaus, Schwellen und Treppenanschlüsse. Abbildung 276, Abbildung 277, Abbildung 278, Abbildung 279, Abbildung 280, Abbildung 281 und Abbildung 282 dokumentieren, dass die Integration eines Niedertemperatur-Wärmeübergabesystems im historischen Bestand nicht nur anlagentechnisch, sondern in hohem Maße auch konstruktiv-räumlich zu lösen ist.

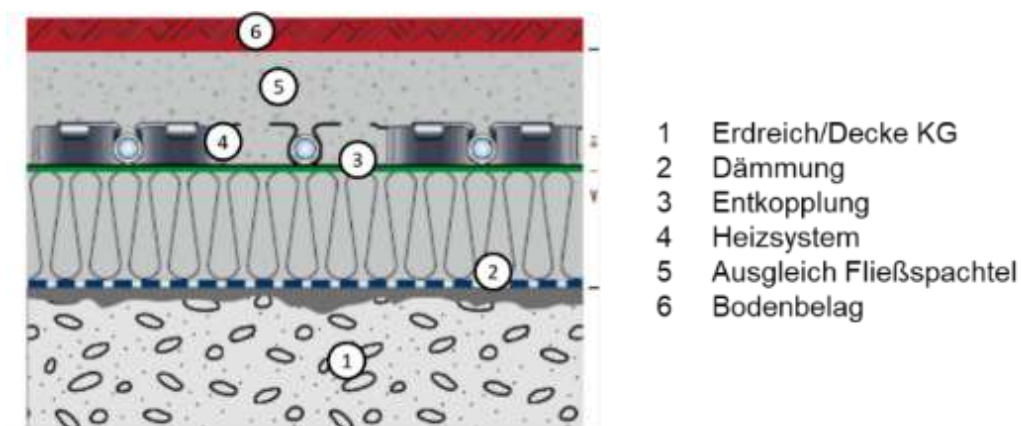


Abbildung 276: Aufbau und Gesamthöhe Fußbodenheizung (ohne Bodenbelag) für EG gegen Erdreich und unbeheizten Raum



Abbildung 277: Antrittsstufe im Bestand

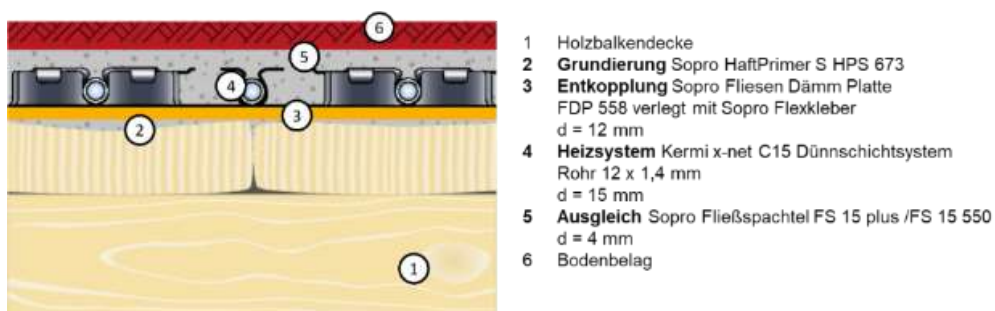


Abbildung 278: Aufbau und Gesamthöhe Fußbodenheizung (ohne Bodenbelag) für OG und DG



Abbildung 279: Boden in DG



Abbildung 280: Aufgang in OG



Abbildung 281: Antrittsstufe zum OG im Bestand



Abbildung 282: Aufgang zu Dachgeschoss

Ein weiterer Schwerpunkt der Planung betrifft die PV- und Dachintegration. Mit Abbildung 283 und Abbildung 284 wird dokumentiert, dass die Dachnutzung nicht losgelöst von der gestalterischen und geometrischen Eignung der jeweiligen Dächer bewertet wurde. Ergänzend ist in Tabelle 56 die objektspezifische Eignung der Dachflächen zusammengeführt. Diese Darstellungen zeigen, dass AP 4.1 auch dort, wo im Projekt noch keine abschließende technische Reife aller Komponenten vorlag, bereits die planerischen und objektspezifischen Voraussetzungen für eine spätere Integration im Quartier systematisch vorbereitet hat.

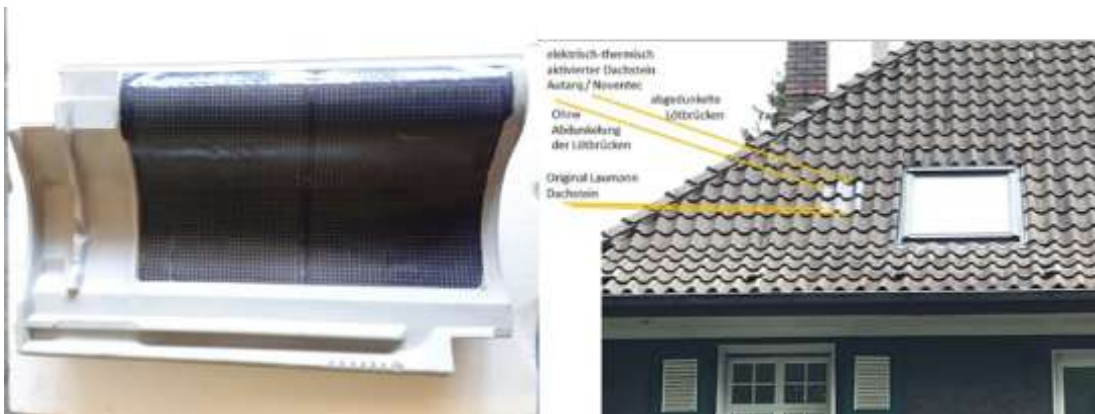


Abbildung 283: rechte Darstellung – Bemusterung originale und thermisch-elektrisch aktivierte Dachsteine linke Darstellung – seit der Bemusterung weiterentwickelter Dachstein ohne farblich angepasste Beschichtung

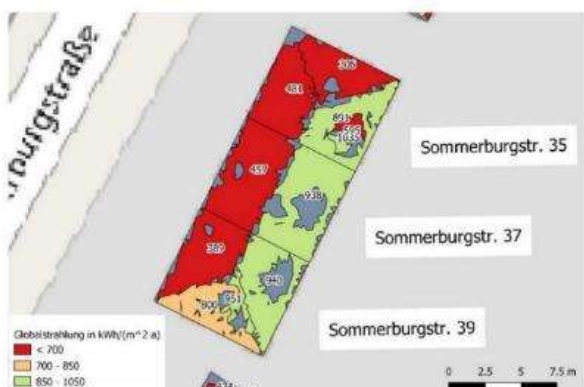


Abbildung 284: Eignung Dächer Sommerburgstraße 35 – 39 (Quelle: GWI Essen)

Tabelle 56: PV-Eignung der Dächer – Sommerburgstraße 35 – 39 (Quelle: GWI Essen)

Objekt	Ausrichtung geeignete Dachfläche	Geeignete Dachfläche (m²)	Globale Strahlung (kWh/m² a)	Diffuse Strahlung (kWh/(m² a))	Direkt Strahlung (kWh/(m² a))
Nr. 35	SO	21	891	257	633
Nr. 37	SO	34	938	258	681
Nr. 39	SO	23,5	940	257	683

Die technische Anlagenplanung wird schließlich über Abbildung 285 und Abbildung 286 in eine übergeordnete Systemlogik gebracht. Für das Referenzobjekt Sommerburgstraße 35 wird dies weiter konkretisiert durch die Auflistung und Darstellung der zum Einsatz kommenden Komponenten: Abbildung 287, Abbildung 288, Abbildung 289, Abbildung 290, Abbildung 291.

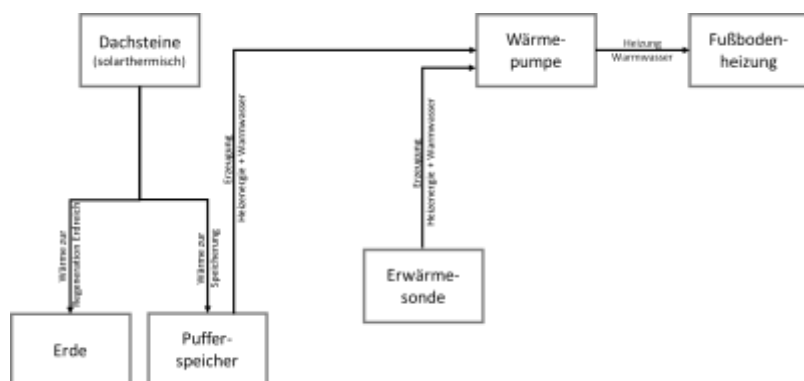


Abbildung 285: Schematische Darstellung der Anlagentechnik – Wärme

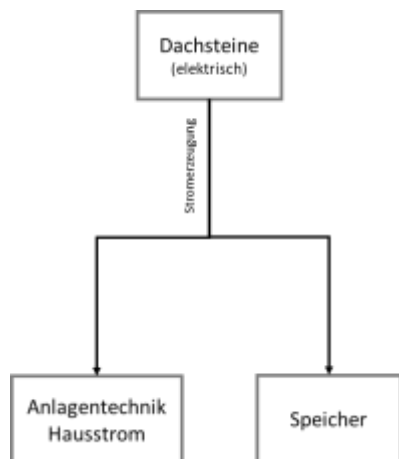


Abbildung 286: Schematische Darstellung der Anlagentechnik – Strom

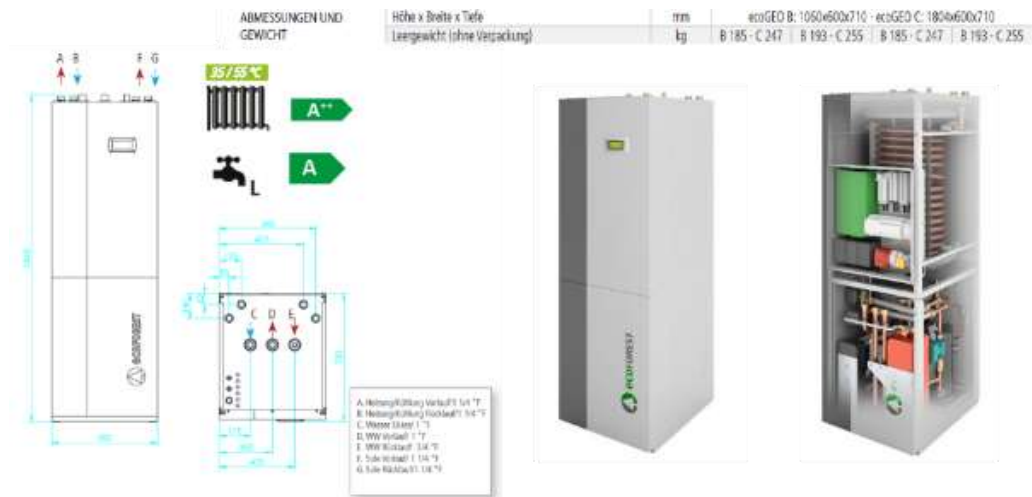


Abbildung 287: Wärmepumpe ecoGeo

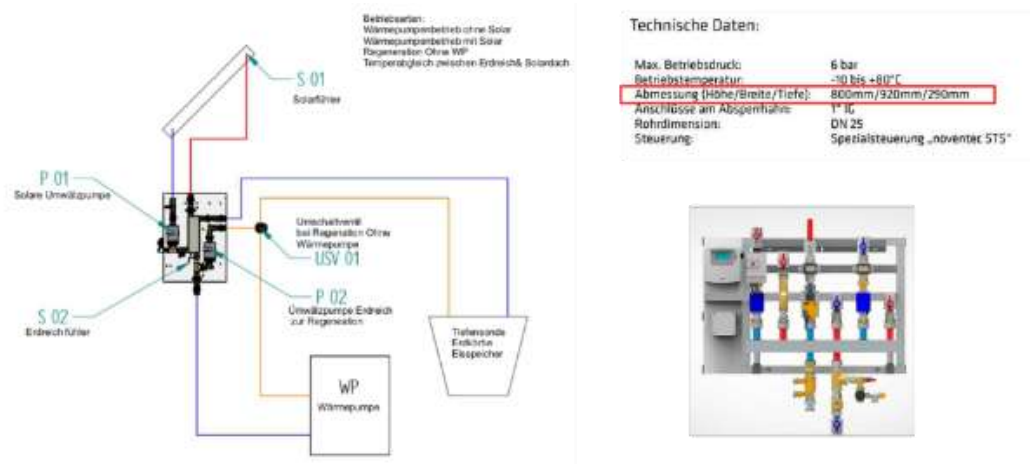


Abbildung 288: Solarstation

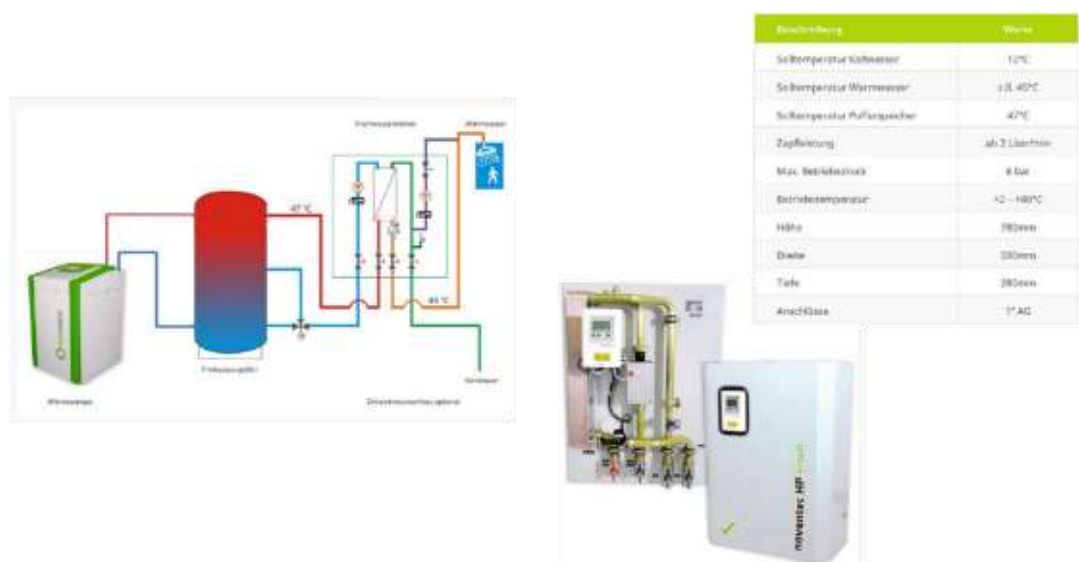


Abbildung 289: Frischwasserstation

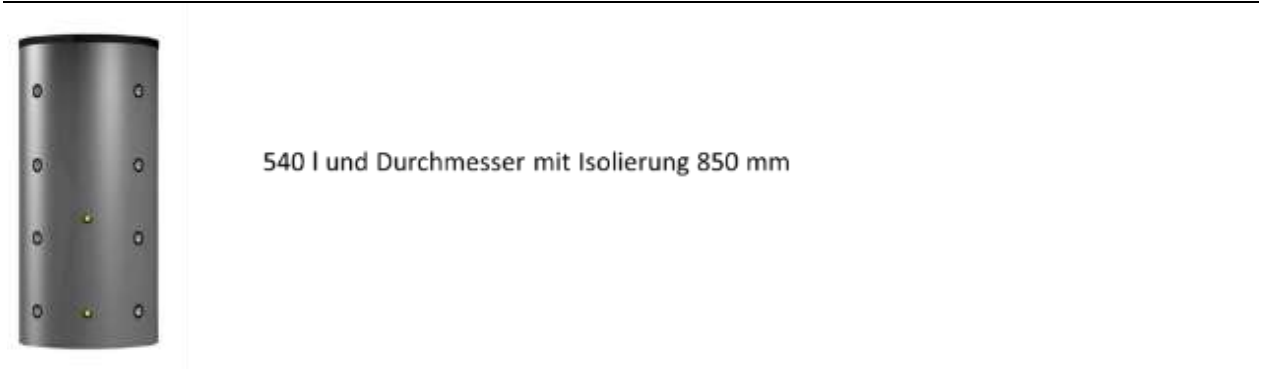


Abbildung 290: Pufferspeicher

Elektrischer Speicher 6



MAX.STORAGE		Technische Daten				
		500 V	1100 V	1500 V	1700 V	2000 V
Eigenschaften	MPPT-Spannungsbereich ¹⁾	500 V - 1100 V	500 V - 1300 V	570 V - 1500 V	600 V - 1500 V	600 V - 1500 V
	Regelbereich	200 - 1100 V				
	Minimale DC-Spannung	Min. 200 V				
	Maximale DC-Spannung	Max. 1500 V				
	Maximale AC-Strom	33,7 (2 x 12,7)				
	Maximale AC-Spannung	230 V				
	AC-Frequenz	50/60 Hz				
	AC-Wellenform	sinusförmig				
	AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	AC-Wellenformfehler	max. 3%				
Eigenschaften	Maximale Leistung ²⁾	6,000 W	9,000 W	12,000 W	12,000 W	15,000 W
	Maximale AC-Strom	27,3 A	41,3 A	54,5 A	54,5 A	67,7 A
	Maximale AC-Spannung	230 V	230 V	230 V	230 V	230 V
	Maximale AC-Frequenz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz
	Maximale AC-Wellenform	sinusförmig				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
Eigenschaften	Maximale Leistung ²⁾	6,000 W	9,000 W	12,000 W	12,000 W	15,000 W
	Maximale AC-Strom	27,3 A	41,3 A	54,5 A	54,5 A	67,7 A
	Maximale AC-Spannung	230 V	230 V	230 V	230 V	230 V
	Maximale AC-Frequenz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz
	Maximale AC-Wellenform	sinusförmig				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				
	Maximale AC-Wellenformfehler	max. 3%				

Abbildung 291: Elektrischer Speicher

Über die eigentliche Planung hinaus umfasste AP 4.1 auch die technische Koordination und Bauüberwachung. Während des Projektzeitraums wurde mehrere Treffen vor Ort sowie zusätzliche online Jour-Fixe zur Koordination der zu sanierenden Objekte durchgeführt. Fertiggestellt und an Mieter übergeben werden konnten alle Objekte. Für diese Objekte war vorgesehen, die ausgewählten Dächer nachträglich mit thermisch-elektrisch aktivierten Dachsteinen einzudecken.

Tabelle 57: Maßnahmen an den einzelnen Objekten

		1	2	3	4	5
	Eigenschaften	Sommerburgstr. 35	Sommerburgstr. 105	Daheim 03 B	Stensstr. 24	Ginsterweg 35
Objektdaten	Wohnfläche aktuell (m²)	79,8	90,07	75,49	80,88	84,94
	Objektart	EFH	EFH	2-MFH	2-MFH	3-MFH
	Lage	Reihenendhaus	Doppelhaushälfte	Doppelhaushälfte, 1.OG und Ausbau DG	EG	1.OG und Ausbau Dach
	Typ Ausrichtung Grundriss	EFH einseitig angebaut NW-SO	EFH einseitig angebaut O-W	MFH einseitig angebaut NO-SW	MFH einseitig angebaut NO-SW	MFH beidseitig angebaut NW-SO
SHDS	Dachflächen	Drei Vier Dachflächen auf drei Häusern	Drei Zwei Dachflächen auf zwei Häusern	Drei Zwei Dachflächen auf zwei Häusern	Eine Dachfläche auf drei Häusern	Eine Dachfläche auf vier Häusern
	Anzahl SHDS ca. (Schätzung 03.2021)	2700 - gem. IWB 3000	2100 - reduziert auf 1280	2100 - reduziert auf 1200	1950 - keine SHDS!	2800 - reduziert auf 750 - keine SHDS
	Dachstein thermisch	ja	ja	ja	ja - nein	ja - nein
	Dachstein elektrisch	ja	ja	ja	ja - nein	ja - nein
Akku	Stromspeicher	ja	ja	ja	ja - nein	ja - nein
Wärmeversorgung	Erdwärmesonden	ja	ja	ja	nein	nein
	Solare Verteilerstation	ja	ja	ja	ja - nein	ja - nein
	Wärmepumpe	ja	ja	ja	nein	nein
	Fußbodenheizung	ja	ja	ja	nein	nein
	Niedertemperatur-Heizkörper	nein	nein	nein	nein	nein
	Konventionelle Heizkörper	nein	nein	nein	ja	ja
	Warmwasser Frischwasserstation	ja	ja	ja	nein (DLE?)	nein (DLE?)
	Therme	nein	nein	nein	ja	ja
Ausstattung	Dämmputz (außer Bad/WC/Küche)	ja	ja	ja	ja	ja
	Dämmung Dach	ja	ja	ja	ja - nein - außer Nr. 24 (DG-Boden)	ja
	Dämmung KG-Decke / DG Boden	nein	nein	nein	ja - nein	nein
	Fenster erneuern	ja	ja	Neue Kastenfenster	ja	ja
	Fenster Kontakte	ja	ja	ja	ja	ja
	Neue Zimmertüren	ja	ja	ja	ja	ja
	Trennwand KG zu EG	ja	ja	nein	nein	nein
	Bemerkungen	Nach der Prüfung der thermischen/solaren Gewinne und Erreichung der erwarteten Gewinne: Freigabe/Verlegung der SHDS auf den anderen Objekten. Eine Dachfläche Richtung NW ausgerichtet = geringe Einstrahlung - Auswertung / Prüfung der thermischen Gewinne im Monitoring.	Alle Dachflächen haben keine optimale Ausrichtung und zusätzlich Verschattung durch Bäume - Auswertung / Prüfung der thermischen Gewinne im Monitoring.	-	Die Whg. im 1.OG wird auch mit Sensoren ausgestattet (Aufputz weil schon modernisiert). Vergleich zwischen Whg. EG / 1.OG im Monitoring. Thermische Gewinne prüfen weil Verschattung durch Baum. Ergänzung SHDS-Gewinne mit Therme in WW-Speicher prüfen (wirtschaftlich).	Whg. EG und DG werden mit an WW-Speicher angeschlossen - Solare Gewinne der SHDS ausreichend? Ergänzung SHDS-Gewinne mit Therme in WW-Speicher prüfen.

AP 4.2 schließt unmittelbar an die in AP 4.1 dargestellten Planungs-, Ausschreibungs- und Abstimmungsprozesse an und überführt die dort vorbereiteten Sanierungskonzepte in die bauliche Realisierung. Ziel dieses Arbeitspakets war die Ausführung der im Projekt untersuchten, gebäudebezogenen Sanierungsmaßnahmen an bis zu fünf Objekten in der Siedlung. Als geplante Arbeitsschritte werden das Einbringen des Dämmputzes, der Einbau der Fußbodenheizung, der Einbau der Wärmepumpe, der Einbau von Smart-Home-Komponenten, der Einsatz aktivierter Dachsteine, der Einbau elektrischer Speicher, der Einbau thermischer Speicher sowie der Ausbau der Kommunikationsnetze benannt. AP 4.2 ist damit als das eigentliche Realisierungsarbeitspaket von Teilprojekt 4 zu verstehen.

Die in den einzelnen Objekten realisierten Maßnahmen sind über Tabelle 57 nachzuvollziehen. Es konnten nicht alle Maßnahmen vollständig abgeschlossen werden. Dies betrifft die SHDS sowie die Stromspeicher. Der Einbau dieser Komponenten nachträglich erfolgen soll. Darüber hinaus hängt die Frage, ob alle drei ausgewählten Objekte noch mit SHDS belegt werden können, von der Lieferung der SHDS durch die Firma EckPack ab. Zum Zeitpunkt der Abgabe des Schlussberichts war hierfür weder ein Termin für die Dacheindeckung bekannt noch ein Liefertermin für neue funktionstüchtige SHDS benannt. Die gebäude- und anlagentechnische Sanierung der Objekte konnte im Wesentlichen abgeschlossen werden, die Einbindung der aktivierten Dachsteine und einzelner elektrischer Speicherkomponenten blieb dagegen zum Berichtszeitpunkt noch offen.

Für die fachliche Bewertung von AP 4.2 ist deshalb zwischen abgeschlossenen baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen einerseits und noch ausstehenden technologiebezogenen Ergänzungen andererseits zu unterscheiden. Abgeschlossen sind insbesondere die für die LowEx-Fähigkeit wesentlichen Maßnahmen der Gebäudeertüchtigung und der anlagentechnischen Grundausstattung in den fertiggestellten Objekten. Offen bleiben hingegen einzelne Bausteine des erweiterten Systemkonzepts, insbesondere dort, wo die Projektergebnisse von der Lieferfähigkeit und technischen Reife externer Komponenten abhängen.

Im Zusammenhang mit AP 4.1 wird darüber hinaus deutlich, dass die Ausführung nicht als isolierter Bauprozess zu verstehen ist, sondern als direktes Ergebnis der zuvor entwickelten objektspezifischen Planung. Die dort abgestimmten Maßnahmenpakete, Bauteilaufbauten und Anlagenschemata wurden in AP 4.2 in reale Demonstratorgebäude überführt. Damit bestätigt das Arbeitspaket grundsätzlich die Umsetzbarkeit der entwickelten Sanierungskonzepte unter den Randbedingungen des denkmalgeschützten Quartiers. Zugleich zeigt sich aber, dass innovative Komponenten mit Prototypencharakter, insbesondere im Bereich der SHDS, in der Ausführung deutlich stärker von externen Unsicherheiten betroffen sind als etablierte gebäude- und anlagentechnische Maßnahmen.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 4.2 somit als das zentrale Realisierungsarbeitspaket der Demonstratorobjekte einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass die geplanten Sanierungsmaßnahmen in mehreren Objekten der Margarethenhöhe baulich umgesetzt und die Gebäude an die Mieter übergeben werden konnten. Zweitens wird mit Tabelle 57 die objektspezifische Ausführung systematisch dokumentiert. Drittens macht der vorliegende Bericht deutlich, dass die vollständige Realisierung des erweiterten Technologiekonzepts, insbesondere im Bereich der SHDS und einzelner Speicherkomponenten, zum Ende des Projektes noch nicht abgeschlossen war und von externen Liefer- und Komponentenproblemen beeinflusst wurde. AP 4.2 belegt damit die grundsätzliche bauliche Umsetzbarkeit der entwickelten Sanierungsstrategien, zeigt aber zugleich, dass der Übergang von der Planung zur vollständigen Systemrealisierung bei innovativen Prototypenkomponenten besonderen Risiken unterliegt.

AP 4.3.1 schließt unmittelbar an die in AP 4.1 und AP 4.2 dargestellten Planungs-, Ausschreibungs- und Ausführungsprozesse an und dokumentiert die fachliche Begleitung der baulichen Umsetzung in den Demonstratorobjekten. Ziel dieses Arbeitspakets die Begleitung und Beratung bei der Umsetzung der Demonstratoren. Als geplante Arbeitsschritte werden die Abstimmung der Planung sowie die Begleitung der Ausschreibung und Ausführung der Sanierungsmaßnahmen benannt. AP 4.3.1 ist damit als dasjenige Arbeitspaket zu verstehen, in dem die in den vorangegangenen Teilprojekten entwickelten Konzepte während der tatsächlichen Umsetzung fachlich begleitet, abgestimmt und bei Bedarf nachgeführt wurden.

Für die fachliche Einordnung ist zunächst wesentlich, dass die Begleitung der Umsetzung nicht nur eine formale Bauüberwachung im engeren Sinne umfasste, sondern die kontinuierliche Abstimmung zwischen den entwickelten Sanierungskonzepten, den objektspezifischen Randbedingungen und dem tatsächlichen Baufortschritt. Damit kommt AP 4.3.1 im Gesamtprojekt eine Scharnierfunktion zu: Die in Teilprojekt 1 entwickelten gebäudebezogenen Sanierungskonzepte, die in Teilprojekt 2 untersuchten Technologien und die in Teilprojekt 3 angelegten Systemlogiken mussten in der praktischen Umsetzung so zusammengeführt werden, dass sie unter den realen Bedingungen des denkmalgeschützten Bestands ausführbar bleiben. Genau diese Übersetzungs- und Begleitfunktion bildet den Kern des Arbeitspakets.

Es ist grundsätzlich festzustellen, dass die Realisierung der grundlegenden Sanierungsmaßnahmen in allen fünf Objekten im beendet wurde. Jedoch ist die Umsetzung nicht in allen Komponenten vollständig abgeschlossen. Offen blieben insbesondere die SHDS, für die bisher nur defekte SHDS geliefert worden waren, sowie die Stromspeicher, die nachträglich installiert werden sollten. Diese Differenzierung ist für die Schlussdarstellung zentral. AP 4.3.1 dokumentiert damit einerseits den erfolgreichen Abschluss der wesentlichen Sanierungsmaßnahmen an allen fünf Demonstratorobjekten, andererseits aber auch die Grenzen der Umsetzung dort, wo sie von extern gelieferten innovativen Prototypenkomponenten abhängig war. Die Begleitung der Planung und Umsetzung musste sich folglich nicht nur auf die Unterstützung der regulären Sanierungsarbeiten richten, sondern auch auf den Umgang mit Verzögerungen und Ausfällen einzelner Technologiebausteine.

Die Begleitung der Ausführung war nicht schematisch oder unabhängig vom Baufortschritt erfolgte, sondern problem- und situationsbezogen. Gerade bei der Umsetzung innovativer Maßnahmen im denkmalgeschützten Bestand ist diese adaptive Begleitung von hoher Bedeutung, weil sich Ausführungsfragen, Detailprobleme und Abstimmungsbedarfe vielfach erst im Zuge der Realisierung konkretisieren. AP 4.3.1 ist deshalb nicht nur als Nachverfolgung eines Terminplans, sondern als flexible fachliche Unterstützung im Realprozess zu verstehen.

Im Zusammenhang mit den vorangegangenen Arbeitspaketen wird zudem deutlich, dass AP 4.3.1 die reale Rückkopplung zwischen Planung und Ausführung sicherstellt. Während AP 4.1 die Maßnahmen genehmigungs- und ausführungsreif vorbereitet und AP 4.2 den Umsetzungsstand der einzelnen Komponenten beschreibt, dokumentiert AP 4.3.1 die begleitende fachliche Absicherung dieses Prozesses auf Gebäude- und Quartiersebene. Das Arbeitspaket bestätigt damit, dass die in EnQM entwickelten integrativen Sanierungskonzepte grundsätzlich in reale Objekte überführt werden konnten, auch wenn einzelne innovative Komponenten noch nicht in der vorgesehenen Vollständigkeit eingebaut werden konnten. Diese Einordnung ist wichtig, weil sie die praktische Anschlussfähigkeit der Projektkonzepte insgesamt stärkt, ohne die noch bestehenden Lücken bei einzelnen Technologien zu verschweigen.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 4.3.1 somit als begleitendes Umsetzungs- und Abstimmungsarbeitspaket innerhalb von Teilprojekt 4 einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass die Sanierungsmaßnahmen in allen fünf Demonstratorobjekten im Wesent-

lichen realisiert werden konnten. Zweitens dokumentiert es, dass die fachliche Begleitung der Planung und Ausführung bis in die Realisierungsphase hinein erforderlich blieb. Drittens wird deutlich, dass die vollständige Umsetzung einzelner innovativer Komponenten, insbesondere der SHDS und der Stromspeicher, zum Ende des Forschungsprojektes nicht abgeschlossen war. Der wissenschaftlich-technische Ertrag von AP 4.3.1 besteht damit vor allem darin, die praktische Umsetzbarkeit der entwickelten Sanierungskonzepte unter Realbedingungen zu begleiten und zugleich die projektbedingten Grenzen bei prototypischen Komponenten transparent zu dokumentieren.

AP 4.3.2 schließt unmittelbar an die in AP 4.1 vorbereitete und in AP 4.2 begonnene Umsetzung der innovativen Dachkomponenten an. Während AP 4.3.1 die Begleitung der allgemeinen Sanierungsmaßnahmen auf Gebäude- und Quartiersebene umfasst, richtet sich der Fokus in AP 4.3.2 spezifisch auf die Umsetzung der geplanten Systeme und Demonstratoren für die intelligenten Dachsteine. Als geplante Arbeitsschritte ist das Einbringen der gefertigten intelligenten PV-Dachsteine in mindestens ein ausgewähltes Bauobjekt sowie Messungen, Analyse und Bewertung der Leistungsfähigkeit des entwickelten PV-Gesamtsystems im beziehungsweise in den umgesetzten Testobjekten zu benennen. Das Arbeitspaket ist noch nicht abgeschlossen. AP 4.3.2 ist damit als begleitendes Umsetzungs- und Validierungsarbeitspaket für die PV-Integration zu verstehen, dass den Übergang von der Technologieentwicklung zur realen Dacheinbindung absichern sollte. Die praktische Umsetzung konzentrierte sich im Forschungszeitraum auf das Objekt Daheim 3B. Die Arbeiten für das Einbauen der SHDS haben begonnen. Die für die Umsetzung ausgewählten Dachflächen werden in Abbildung 292 gezeigt.



Abbildung 292: oben – Dachfläche Richtung Straße unten – Giebelseite

Bereits im Zuge der Ausführung zeigte sich jedoch, dass die reale Dacheinbindung der SHDS mit technischen Problemen verbunden war. Der Bericht hält fest, dass vor Ort Undichtigkeiten im Bereich der Anschlüsse der Wärmetauscher festgestellt wurden. Nach Rücksprache mit den Projektpartnern wurde deshalb entschieden, die Dachseite Richtung Straße nur elektrisch (PV) anzuschließen, während die Giebelseite nach Reparatur der Anschlüsse sowohl thermisch als auch elektrisch betrieben werden sollte. Diese Entscheidung ist für die Bewertung des Arbeitspakets zentral, weil sie zeigt, dass die Begleitung der PV-Umsetzung nicht nur im Einbau bestand, son-

dern auch in der technischen Anpassung des Umsetzungswegs an vor Ort erkannte Mängel. Die PV-Integration musste damit bereits in der Montagephase differenziert werden, statt das ursprünglich vorgesehene hybride Konzept unverändert umzusetzen.

Der bauliche Fortschritt dieser Arbeiten wird über die folgenden Abbildungen dokumentiert. Abbildung 293 zeigt den geöffneten Dachbereich als Voraussetzung für die Verlegung der neuen Komponenten. Abbildung 294 veranschaulichen die Einordnung der neuen Dachsteine in den Bestandskontext sowie den begonnenen Einbau im Bereich der straßenseitigen Dachfläche. Ergänzend zeigt Abbildung 296 den vorbereiteten Anschlusszustand für die thermische Einbindung. Für die Schlussfassung ist diese Bildgruppe besonders wichtig, weil sie den Zwischenstand der Umsetzung anschaulich dokumentiert und zugleich verdeutlicht, dass die Integration der SHDS im Bestand nicht nur eine elektrotechnische, sondern auch eine konstruktive und hydraulische Anschlussaufgabe darstellt.



Abbildung 293: Aufgedecktes Dach – Daheim 3 B



Abbildung 294: Originalziegel und SHDS – Richtung Straße



Abbildung 295: SHDS – Richtung Straße



Abbildung 296: vorbereiteter thermischer Anschluss SHDS

Im weiteren Verlauf trat jedoch ein deutlich gravierenderes Problem zutage. Nach der Reparatur der SHDS im Juli 2024, die vom IWB und IAS durchgeführt wurde, zeigte, dass die bereits auf dem Dach des Objekts Daheim 3B befindlichen SHDS große Schäden aufwiesen. Konkret hatten sich bei mehr als 40 % der Dachsteine die aufgeklebten PV-Lamine gelöst. Die nachfolgende Überprüfung ergab, dass die Verklebung der Dachsteine mit den PV-Laminen fehlerhaft war. Dieser Befund ist für AP 4.3.2 der entscheidende fachliche Kern, weil er die Überführung der in Teilprojekt 2 entwickelten PV-Technologie in die reale Dacheinbindung unmittelbar begrenzt hat. Die thermische Seite der Dachsteine war nach der Reparatur zwar einsatzfähig, infolge der fehlerhaften Verklebung konnten die SHDS jedoch nicht auf dem Dach des Objekts Daheim 3B eingebaut werden.

Damit unterscheidet sich AP 4.3.2 von den übrigen Begleitungsarbeitspaketen in Teilprojekt 4. Während die gebäudebezogenen Sanierungsmaßnahmen in den Demonstratorobjekten im Wesentlichen umgesetzt werden konnten, zeigt sich hier besonders deutlich, dass die reale Anwendung innovativer Prototypenkomponenten anderen Risiken unterliegt als etablierte Bau- und Anlagentechnik. Die Begleitung der PV-Umsetzung hatte daher nicht nur die Funktion, den Einbau zu unterstützen, sondern vor allem die Aufgabe, Mängel im realen Einsatz frühzeitig sichtbar zu machen, technisch einzuordnen und zu dokumentieren.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 4.3.2 somit als begleitendes Umsetzungs- und Problemerkennungspaket für die PV-Dachintegration einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass die Umsetzung der geplanten PV- beziehungsweise SHDS-Komponenten am Objekt Daheim 3B real begonnen und konstruktiv vorbereitet wurde.

AP 4.4.1 schließt unmittelbar an die bauliche und anlagentechnische Umsetzung der Demonstratorobjekte an und übernimmt die Aufgabe, das interne Monitoring für die Einregulierungsphase fachlich zu definieren, abzustimmen und in die Umsetzung zu überführen. Ziel dieses Arbeitspakets war die Erstellung und Umsetzung des Monitoringkonzeptes in den sanierten Gebäuden. Als geplante Arbeitsschritte werden die Auswahl der zu messenden Größen, die Auswahl der Messtechnik, die Auswahl der Datenerfassung, die Koordination und Überwachung der Installation der Messtechnik und Inbetriebnahme, die Prüfung der erfassten Messdaten auf Vollständigkeit und Plausibilität sowie die Erfassung und Aufbereitung der Energieverbrauchsdaten benannt. AP 4.4.1 ist damit als das grundlegende interne Monitoringarbeitspaket der Demonstratorphase zu verstehen.

Für die fachliche Einordnung ist zunächst wesentlich, dass das Monitoringkonzept nicht einheitlich für alle Objekte, sondern objektspezifisch in Abhängigkeit vom jeweiligen Sanierungskonzept aufgebaut wurde. AP 4.4.1 verfolgt kein starres Messschema, sondern die messtechnische Begleitung zielt an den installierten Komponenten und den zu bewertenden Funktionen der einzelnen Demonstratorobjekte ausrichtet. Gerade im Kontext unterschiedlich sanierter Bestandsgebäude ist diese Differenzierung fachlich notwendig, weil nur so die für die Einregulierungsphase tatsächlich relevanten Betriebs- und Zustandsgrößen erfasst werden können.

Erfasst werden sollten Strom für Beleuchtung und Steckdosen je Raum, Raumklima mit Temperatur, relativer Luftfeuchte und CO₂ je Raum, der Status der Fenster, die Hilfsenergie der Energieerzeuger, der Wärmebedarf, die Warmwassererfassung, die erzeugte thermische Energie der Dachsteine, soweit vorhanden, sowie die erzeugte elektrische Energie der Dachsteine, ebenfalls soweit vorhanden. Darüber hinaus war ausdrücklich eine Beurteilung der Qualität der neuartigen Dachsteine im Sinne der Langzeiteffizienz vorgesehen. Diese Auflistung zeigt, dass AP 4.4.1 nicht auf die Erfassung klassischer Verbrauchsdaten beschränkt war. Vielmehr sollte ein Monitoring aufgebaut werden, das sowohl energetische Kennwerte, raumklimatische Zustände, Anlagenbetrieb als auch die Funktion innovativer Komponenten gemeinsam abbildet. Gerade diese Breite der Messgrößen ist für die Einregulierungsphase zentral, weil Betriebsabweichungen nur dann sicher eingeordnet werden können, wenn Verbrauch, Komfort, Anlagentechnik und Komponentenzustand zusammen betrachtet werden.

Ein weiterer Schwerpunkt des Arbeitspakets lag auf der organisatorischen und technischen Abstimmung der Messinfrastruktur. Für das Energie- und Strommonitoring wurden seitens des IWB Listen der notwendigen Messstellen erstellt und an die Verantwortlichen des Langzeitmonitorings übergeben. Zusätzlich wurden in allen Objekten die Monitoringsysteme für Bauteil, Klima sowie Status Fenster/Türen an die Kolleginnen und Kollegen des Langzeitmonitorings übergeben. Daraus wird deutlich, dass AP 4.4.1 nicht nur die Auswahl der Messgrößen umfasst, sondern auch die strukturierte Vorbereitung der späteren Langzeitbeobachtung. Das interne Monitoring der Einregulierungsphase wurde damit von Anfang an so angelegt, dass die gewonnenen Daten und Messpunkte in eine weitergehende wissenschaftliche Nachverfolgung überführt werden können.

Für die Bewertung des Arbeitspakets ist außerdem wesentlich, dass die geplanten Schritte ausdrücklich sowohl die Installation als auch die Qualitätssicherung der Messdaten umfassen. Gerade im Zusammenhang mit der Einregulierung von Wärmepumpen, Speicherkomponenten und digitalen Systemen ist dies von hoher Bedeutung, weil fehlerhafte, unvollständige oder nicht plausibilisierte Messdaten keine belastbare Grundlage für Betriebsanpassungen liefern würden. AP

4.4.1 schafft damit die Voraussetzung, die späteren Optimierungen auf eine tragfähige Datengrundlage zu stützen.

Im Zusammenhang mit dem Gesamtprojekt wird zudem deutlich, dass AP 4.4.1 eine direkte Rückkopplung zu den vorangegangenen Teilprojekten herstellt. Die in Teilprojekt 1 entwickelten Monitoring- und Bewertungsansätze, die in Teilprojekt 2 untersuchten Technologien und die in Teilprojekt 3 modellierten Systemzusammenhänge werden hier in ein objektspezifisches Messkonzept für den realen Betrieb übersetzt. Das Arbeitspaket übernimmt somit eine Scharnierfunktion zwischen technischer Umsetzung, Betriebsbeobachtung und nachfolgender Einregulierung. Es sorgt dafür, dass die Demonstratorobjekte nach ihrer baulichen Fertigstellung nicht als abgeschlossene Bauleistungen betrachtet werden, sondern als wissenschaftlich begleitete Realsysteme, deren Funktion und Effizienz aktiv beobachtet und bewertet werden.

AP 4.4.2 schließt unmittelbar an das in AP 4.4.1 definierte interne Monitoring der Demonstratorobjekte an und erweitert dieses um die Perspektive eines anschließenden externen beziehungsweise langfristigen Monitorings außerhalb des eigentlichen Projektbetriebs. Ziel des Arbeitspakets war der optimale Übergang vom projektbegleitenden Kurzzeitmonitoring zum anschließenden Langzeitmonitoring außerhalb des Projekts. Als geplante Arbeitsschritte werden die Definition der für die unterschiedlichen Monitoringaufgaben nutzbaren messtechnischen Komponenten, die Abstimmung des Einbaus im Rahmen der Sanierung sowie die Übernahme der ersten messtechnischen Ergebnisse aus der Einregulierungsphase benannt. AP 4.4.2 ist damit als dasjenige Arbeitspaket zu verstehen, in dem die Monitoringstrategie vom objektbezogenen Einregulierungswerkzeug zu einer dauerhaft nutzbaren Betriebs- und Auswertungsinfrastruktur weiterentwickelt wird.

Ein erster Schwerpunkt lag auf der Untersuchung geeigneter Infrastrukturen zur Datenerhebung, Datenspeicherung und Datenbereitstellung. Am EBC wurden unterschiedliche Infrastrukturen intensiv untersucht und dass für das Langzeitmonitoring in Phase 2 eine cloudbasierte Datenspeicherung angestrebt wird, die in einem Unterauftrag an spezialisierte Firmen vergeben werden soll. Damit wird deutlich, dass AP 4.4.2 nicht nur auf die technische Erfassung von Messdaten zielt, sondern auf den Aufbau einer stabilen und längerfristig betreibbaren Datenarchitektur. Gerade für die wissenschaftliche Nachverfolgung der Demonstratorobjekte ist diese Trennung zwischen kurzfristigem Projektmonitoring und späterem Langzeitbetrieb von zentraler Bedeutung.

Darauf aufbauend wurde das Konzept konkretisiert. Zentraler Baustein ist dabei ein Industrie-PC als Datenlogger, der in das vorhandene Automationsnetz integriert werden soll. Der Datenlogger fungiert als Gateway zum Internet und ermöglicht den Datentransfer zur Cloud-Plattform, indem er die Daten aus Automationssystemen, Steuerungen und Energieanlagen direkt im Automationsnetz abgreift. Diese Systemarchitektur ist für die Schlussfassung besonders wichtig, weil sie zeigt, dass das externe Monitoring nicht als paralleles Zusatzsystem neben die Gebäudeautomation gestellt wird, sondern direkt auf die vorhandene technische Infrastruktur der Demonstratorobjekte aufsetzt.

Für die eigentliche Kommunikation im Gebäudeautomationsnetz wird ausdrücklich das Kommunikationsprotokoll Modbus empfohlen. Der Datenlogger soll hierzu regelmäßige Modbus-Scans ausführen; deren Frequenz hängt von der Performance der jeweiligen speicherprogrammierbaren Steuerung im Automationsnetz ab. Für die Verbindung zwischen Datenlogger und Cloudinfrastruktur soll dagegen das MQTT-Protokoll verwendet werden. Zusätzlich wird ausgeführt, dass die Kommunikation mittels TLS verschlüsselt werden könnte. Für die Schlussdarstellung ist diese Aufteilung fachlich zentral: AP 4.4.2 entwickelt keine generische IT-Lösung, sondern eine klar definierte Kommunikationskette aus Modbus im lokalen Automationsnetz und MQTT für die übergeordnete Datenübertragung, ergänzt um Sicherheitsmechanismen auf Transportebene.

Ein weiterer wesentlicher Punkt des Arbeitspakets ist die Sicherstellung der Zuverlässigkeit der Datenübertragung. Hierzu sind mehrere konkrete Mechanismen zu benennen. So soll jede Nachricht aus dem Gebäudesystem mindestens einmal die Plattform erreichen. Zudem führt die Software auf dem Datenlogger bei erfolgreichem Zugang zum Gebäudeautomationsnetz eine Netzexploration durch und speichert die Daten zusätzlich in einem Pufferspeicher, um Datenverluste bei Netzausfällen zu vermeiden. Darüber hinaus ist vorgesehen, zur Reduktion des Datenverkehrs nur Änderungen oberhalb eines festgelegten Schwellwertes zu erfassen; dies wird als Change-of-Value-Events (COV) bezeichnet. Diese Passage ist für die Schlussfassung besonders wertvoll, weil sie zeigt, dass AP 4.4.2 die Monitoringinfrastruktur nicht nur funktional, sondern auch im Hinblick auf Robustheit, Datensicherheit und Datenökonomie ausarbeitet.

Es wurde außerdem deutlich, dass die technische Umsetzung des externen Monitorings in enger Abstimmung mit dem Unterauftragnehmer und dem Liegenschaftsbetreiber vorbereitet werden muss. Insbesondere für die Datenübertragung über den MQTT-Broker ist die Freigabe bestimmter Ports in der Firewall des Automationsnetzes erforderlich. Der Datenlogger kann anschließend über eine gesicherte SSH-Verbindung konfiguriert werden, sobald die Internetverbindung einmal eingerichtet wurde. Für die fachliche Bewertung ist dies ein wichtiger Hinweis darauf, dass AP 4.4.2 nicht nur ein technisches Soll-Konzept beschreibt, sondern bereits die realen Randbedingungen des Betriebs, insbesondere IT-Sicherheit, Betreiberzuständigkeiten und Freigabeprozesse, einbezieht.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der späteren Datenvisualisierung und Auswertung. Hierfür ist die offene Plattform Grafana vorgesehen. Diese soll direkt auf die cloudbasierte Datenbank zugreifen und auch bei hochaufgelösten Daten über lange Zeiträume leistungsfähig bleiben. Über eine API können die Daten auf individuelle Nutzerbedürfnisse, Alarmfunktionen und die Datenbearbeitung über Tags zugeschnitten und bereitgestellt werden. Damit zeigt AP 4.4.2, dass das externe Monitoring nicht auf die reine Datenspeicherung beschränkt wird. Vielmehr wird von Anfang an eine Struktur vorbereitet, die sowohl die wissenschaftliche Auswertung als auch betriebliche Nutzungen wie Alarmierung und individualisierte Visualisierung unterstützt.

Schließlich wurden im Arbeitspaket auch konkrete Anforderungen an die messtechnischen Komponenten für Strom und Wärme abgeleitet. Strom- und Wärmezähler zur Einbindung in das Automationsnetz müssen integrierte Modbus-Schnittstellen enthalten. Für Zähler mit anderen Protokollen sind zusätzliche Gateways vorgesehen. Darüber hinaus wurde die Anzahl der notwendigen Strom- und Wärmemengenzähler bestimmt.

In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 4.4.2 somit als das zentrale Infrastrukturpaket für den Übergang vom Projektmonitoring zum Langzeitmonitoring einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass für die Demonstratorobjekte eine cloudbasierte Langzeitarchitektur vorbereitet wurde. Zweitens wird mit dem Ansatz aus Industrie-PC/Datenlogger, Modbus, MQTT, TLS, Pufferspeicherung und COV-Logik eine technisch konsistente und robuste Datenkette beschrieben. Drittens wurden die Anforderungen an Zähler, Gateways, Firewallfreigaben und Visualisierung so konkretisiert, dass eine spätere dauerhafte Betriebsbeobachtung der Demonstratorobjekte methodisch vorbereitet ist. Der wissenschaftlich-technische Ertrag von AP 4.4.2 besteht damit vor allem darin, die externe Monitoringinfrastruktur für die weitere wissenschaftliche und betriebliche Begleitung der sanierten Gebäude konzeptionell und technisch vorzubereiten.

AP 4.4.3 schließt unmittelbar an die in AP 4.4.1 und AP 4.4.2 entwickelten Monitoringkonzepte an und bildet innerhalb von Teilprojekt 4 die eigentliche betriebliche Umsetzungsphase des Monitorings. Während in den vorangegangenen Unterarbeitspaketen zunächst die internen Messgrößen definiert, die Messtechnik abgestimmt und anschließend die Voraussetzungen für ein ex-

ternes beziehungsweise langfristiges Monitoring geschaffen wurden, richtet sich der Fokus nun auf die praktische Nutzung dieser Daten für die Inbetriebnahme und Einregulierung der umgesetzten Maßnahmen. AP 4.4.3 übernimmt damit die Aufgabe, die sanierten Demonstratorobjekte aus einem technisch installierten Zustand in einen abgestimmten und energieoptimierten Realbetrieb zu überführen.

Die Zielsetzung des Arbeitspakets ist dabei klar betriebsorientiert formuliert. Im Zentrum steht nicht allein die Kontrolle, ob einzelne Anlagen grundsätzlich funktionieren, sondern die Frage, ob die tatsächlich eingestellte Betriebsweise mit den im Projekt entwickelten Empfehlungen übereinstimmt und ob sich aus den Monitoringdaten ein Anpassungsbedarf ableiten lässt. Hierfür können ausdrücklich drei Arbeitsschritte beschrieben werden: erstens die Überprüfung der anlagentechnischen Funktionen, zweitens den Abgleich von empfohlener und vorhandener Betriebsweise und drittens die bedarfsweise Anpassung der Funktionsweise für einen optimierten, energiesparenden Betrieb. Diese Struktur macht deutlich, dass AP 4.4.3 als unmittelbare Schnittstelle zwischen Messtechnik, Anlagenbetrieb und Optimierung zu verstehen ist.

Inhaltlich knüpft diese Einregulierungsphase direkt an die zuvor aufgebaute Monitoringinfrastruktur an. Die in AP 4.4.1 definierten Messgrößen zu Raumklima, Energieverbräuchen, Hilfsenergien, Fensterstatus, Wärmebedarf und Warmwasser sowie die in AP 4.4.2 vorbereitete externe Dateninfrastruktur schaffen die Voraussetzung dafür, Betriebszustände nicht nur punktuell, sondern systematisch auszuwerten. AP 4.4.3 nutzt diese Datengrundlage, um die im realen Betrieb auftretenden Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlicher Funktionsweise sichtbar zu machen und daraus Anpassungen abzuleiten. Damit wird deutlich, dass das Monitoring im Projekt nicht als reine Dokumentation verstanden wird, sondern als aktives Werkzeug der Betriebsoptimierung. So wurde der Normalbetrieb der technischen Anlagen nach dem Winter 2022/2023 in den Einfamilienhäusern dahingehend optimiert, dass die Heizkurven an die Bedürfnisse der Mieter angepasst wurden. Diese Aussage ist für die Schlussfassung besonders bedeutsam, weil sie zeigt, dass die Einregulierungsphase bereits im Projektverlauf zu realen betriebsseitigen Optimierungen geführt hat. Die Einregulierung blieb damit nicht auf eine formale Inbetriebnahme beschränkt, sondern führte zu einer Anpassung der Anlagenparameter an die tatsächlichen Nutzungsbedingungen in den Gebäuden. Gerade im denkmalgeschützten Bestand mit seinen heterogenen Gebäudestrukturen und Nutzungsprofilen ist diese Nutzer- und objektspezifische Feinabstimmung ein wesentlicher Bestandteil eines funktionsfähigen LowEx-Betriebs.

Zugleich ist festzustellen, dass weitere Optimierungen im Rahmen des Forschungsprojektes EnQM Phase II erfolgen. Für die fachliche Einordnung ist dies wichtig, weil AP 4.4.3 damit ausdrücklich nicht als abgeschlossene Endoptimierung, sondern als erster systematischer Schritt in einen längerfristig begleiteten Betriebsprozess zu verstehen ist. Die Einregulierung wird damit als lernender Prozess beschrieben, bei dem die ersten Monitoringergebnisse bereits genutzt wurden, eine vollständige betriebliche Optimierung jedoch erst im weiteren Projektverlauf beziehungsweise in einer Anschlussphase erfolgen kann. Diese Offenheit stärkt die Nachvollziehbarkeit der Darstellung, weil der tatsächliche Reifegrad der Betriebsoptimierung nicht überzeichnet wird. In der zusammenfassenden fachlichen Bewertung ist AP 4.4.3 somit als das betriebsoptimierende Abschlussarbeitspaket der Monitoringphase einzuordnen. Das Arbeitspaket zeigt erstens, dass die im Projekt installierten technischen Systeme nicht nur in Betrieb genommen, sondern anhand von Monitoringdaten hinsichtlich ihrer realen Betriebsweise überprüft wurden. Zweitens konnte durch den Abgleich von empfohlener und vorhandener Betriebsweise bereits eine erste konkrete Optimierung vorgenommen werden, insbesondere durch die Anpassung der Heizkurven in den Einfamilienhäusern nach dem Winter 2022/2023. Drittens macht der vorliegende Bericht deutlich, dass die Einregulierungsphase zum Ende des Forschungsprojektes noch nicht vollständig abgeschlossen war, sondern in EnQM Phase II weitergeführt werden soll.

TEIL III: Energiebilanzierung

Die Energiebilanzierung dient der quantitativen Bewertung der energetischen Wirkung der im Rahmen des Vorhabens entwickelten und exemplarisch umgesetzten Maßnahmen. Ziel war es, sowohl die Veränderung des Energiebedarfs als auch die strukturelle Verschiebung der Energieflüsse im Demonstratorbetrieb nachvollziehbar darzustellen. Neben der reinen Verbrauchsreduktion stand insbesondere die Systemintegration im LowEx-Kontext im Fokus der Betrachtung.

Die Bilanzierung basiert auf einer Kombination aus dynamischer Gebäudesimulation, thermisch-hygrischen Bauteilanalysen sowie realen Monitoringdaten aus dem Demonstratorbetrieb. Die gemessenen Energie- und Leistungswerte wurden zur Kalibrierung der Simulationsmodelle herangezogen, sodass eine belastbare Gegenüberstellung zwischen berechnetem und realem Betrieb möglich ist.

Quantitative Energiekennwerte auf Gebäudeebene

Die zentralen Energiekennwerte der Demonstratorgebäude vor und nach Umsetzung der Maßnahmen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 58: Vergleich der zur Berechnung verwendeten und gemessenen Jahresverbräuche bezogen auf die beheizte Wohnfläche (BWF).

Gebäudetyp	Berechneter Gasverbrauch [kWh/(m²a BWF)]	Gemessener Gasverbrauch [kWh/(m²a BWF)]
EFH	197	295
RH	167	146
MFH	160	141

Die Tabelle stellt insbesondere folgende Kenngrößen gegenüber:

- spezifischer Heizwärmebedarf (kWh/m²a),
- Endenergiebedarf für Wärme,
- Strombedarf der Wärmepumpe,
- Anteil lokal erzeugter PV-Energie,
- Eigenverbrauchsquote,
- rechnerische CO₂-Emissionen.

Aus der tabellarischen Gegenüberstellung ergibt sich eine deutliche Reduktion des spezifischen Heizwärmebedarfs infolge der innenseitigen Hüllverbesserung und der Dachertüchtigung. Die Verringerung der Transmissionswärmeverluste führt zu einer Absenkung der erforderlichen Systemtemperaturen und damit zu verbesserten Betriebsbedingungen für die Wärmepumpentechnologie. Gleichzeitig zeigt die Tabelle die strukturelle Verschiebung der Energieträger: Während im Ausgangszustand fossile Energieträger dominierend waren, erfolgt im Demonstratorzustand eine Elektrifizierung der Wärmebereitstellung. Diese Verschiebung führt zu einer Erhöhung des elektrischen Endenergieanteils, jedoch bei gleichzeitig verbesserter Primärenergie- und CO₂-Bilanz. Die Eigenstromnutzung durch photovoltaische Erzeugung trägt zusätzlich zur Reduktion des Netzstrombezugs bei. Auch wenn der absolute Anteil witterungsabhängig schwankt, zeigt sich eine signifikante Verbesserung der bilanziellen Gesamtbewertung.

Insgesamt belegt die Tabelle quantitativ, dass die energetische Optimierung nicht nur rechnerisch, sondern auch im gemessenen Realbetrieb nachvollziehbar wirksam ist.

Zeitliche Dynamik und Systemintegration

Neben der Jahresbilanz ist die Betrachtung der zeitlichen Lastverläufe entscheidend für die Bewertung der Systemintegration. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf von Wärmebedarf, Strombedarf der Wärmepumpe, PV-Erzeugung sowie Netzbezug.

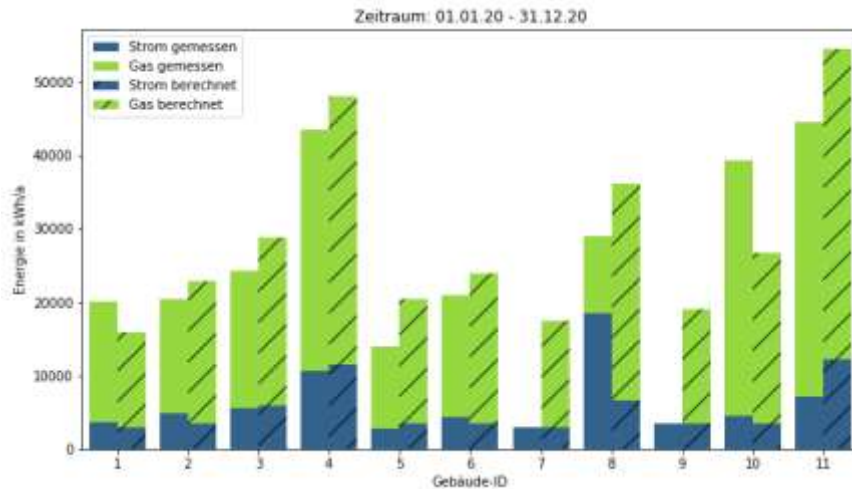


Abbildung 297: Vergleich zwischen den gemessenen Jahresverbräuchen des Jahres 2020 der Gebäude mit Smart Metern im Quartier mit Berechnungen basierend auf Standardannahmen.

Die grafische Darstellung verdeutlicht mehrere systemrelevante Effekte:

1. Saisonale Dynamik

Während der Heizperiode steigt der elektrische Leistungsbedarf infolge des Wärmepumpenbetriebs deutlich an. Gleichzeitig ist die PV-Erzeugung in dieser Phase geringer, wodurch höhere Residuallasten entstehen.

2. Sommerbetrieb

In den Sommermonaten reduziert sich der Wärmebedarf erheblich. Der verbleibende Strombedarf wird teilweise oder vollständig durch PV-Erzeugung gedeckt, was zu einer deutlichen Reduktion des Netzbezugs führt.

3. Lastverschiebung und Eigenverbrauch

Die Überlagerung von PV-Erzeugung und Wärmepumpenbetrieb zeigt Potenziale zur Lastverschiebung. Insbesondere in Übergangszeiten kann ein relevanter Anteil des Strombedarfs direkt aus lokaler Erzeugung gedeckt werden.

4. Strukturelle Veränderung der Energieflüsse

Im Vergleich zum Ausgangszustand, in dem Wärme dezentral fossil bereitgestellt wurde, entsteht ein gekoppeltes, elektrisch dominiertes Energiesystem. Dieses erfordert eine intelligente Regelung, bietet jedoch zugleich Optimierungspotenziale auf Systemebene.

Abbildung 297 macht deutlich, dass die energetische Transformation nicht ausschließlich als Reduktion von Jahreskennwerten zu verstehen ist, sondern als grundlegende Veränderung der Energieflusststruktur im Gebäude.

CO₂-bilanzielle Bewertung

Die rechnerische CO₂-Bilanz zeigt eine deutliche Reduktion der direkten Emissionen durch den Ersatz fossiler Wärmeerzeuger. Zwar steigt der Strombedarf, jedoch verbessert sich die Gesamtbilanz aufgrund:

- höherer Systemeffizienz,
- zunehmender Dekarbonisierung des Strommixes,

- partieller Eigenstromerzeugung.

Langfristig – unter Annahme eines weiter steigenden Anteils erneuerbarer Energien im Stromsektor – ist eine deutliche Emissionsminderung realistisch.

Validierung durch Monitoring

Die Gegenüberstellung von Simulation und Realbetrieb zeigt eine insgesamt gute Übereinstimmung. Abweichungen lassen sich im Wesentlichen auf:

- nutzerbedingte Schwankungen,
- individuelle Lüftungs- und Heizgewohnheiten,
- Einregulierungsphasen nach Inbetriebnahme,
- klimatische Unterschiede zum Referenzjahr

zurückführen.

Die Validierung bestätigt die grundsätzliche Belastbarkeit der entwickelten Modelle und Planungsansätze.

Tabelle 58 liefert die quantitativen Nachweise der Energieeinsparung, während die Abbildung die systemische Funktionsweise und die Dynamik des neuen Energiekonzepts verdeutlicht. Beide Darstellungen ergänzen sich in ihrer Aussagekraft. Zusammenfassend zeigt die Energiebilanzierung:

- eine signifikante Reduktion des Heizwärmebedarfs,
- eine erfolgreiche Umsetzung des LowEx-Konzepts,
- eine funktionierende Integration regenerativer Stromerzeugung,
- ein relevantes CO₂-Minderungspotenzial,
- eine belastbare Grundlage für eine skalierte Quartiersübertragung.

Die Ergebnisse belegen, dass eine energetische Transformation unter denkmalrechtlichen Randbedingungen technisch umsetzbar ist und im Realbetrieb nachweisbare Effekte erzielt.

TEIL IV: Erfahrungen mit den angewendeten Planungswerkzeugen

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden verschiedene Planungs- und Simulationswerkzeuge eingesetzt, um die energetische Transformation eines denkmalgeschützten Quartiers integrativ zu analysieren und zu bewerten. Die eingesetzten Instrumente umfassten thermisch-hygrische Bauteilsimulationen, dynamische thermische Gebäudesimulationen, quartiersbezogene Lastflussmodelle, regelungstechnische Optimierungsmodelle sowie Monitoring- und Datenmanagementsysteme. Die Anwendung dieser Werkzeuge ermöglichte eine wissenschaftlich fundierte Planung unter komplexen bauphysikalischen, technischen und denkmalrechtlichen Randbedingungen. Gleichzeitig ergaben sich im Projektverlauf differenzierte Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, ihrer Grenzen und ihrer Praxistauglichkeit.

Die thermisch-hygrischen Simulationen erwiesen sich insbesondere im Zusammenhang mit der Bewertung innenseitiger Dämmmaßnahmen als unverzichtbar. Sie ermöglichten eine detaillierte Analyse von Temperatur- und Feuchteverläufen innerhalb historischer Wandquerschnitte und lieferten eine belastbare Grundlage zur Einschätzung möglicher Tauwasser- und Feuchterisiken. Dabei zeigte sich jedoch, dass die Aussagekraft der Modelle stark von der Qualität der zugrunde gelegten Materialparameter und Randbedingungen abhängt. Gerade im historischen Bestand weichen reale Materialeigenschaften häufig von standardisierten Literaturwerten ab, sodass projektspezifische Parametrisierungen erforderlich sind. Zudem reagieren die Simulationsergebnisse sensibel auf Annahmen zum Innenklima, zur Schlagregenbeanspruchung oder zur Luftdichtheit. Insgesamt haben sich die hygrothermischen Werkzeuge als leistungsfähig erwiesen, erfordern jedoch einen hohen Modellierungs- und Validierungsaufwand.

Die dynamische thermische Gebäudesimulation bildete die Grundlage für die energetische Bewertung verschiedener Sanierungsvarianten sowie für die Auslegung der Anlagentechnik. Die Abbildung komplexer historischer Gebäudestrukturen mit unterschiedlichen Bauphasen, heterogenen Bauteilaufbauten und variierenden Nutzungsmustern war grundsätzlich möglich, jedoch modellierungstechnisch anspruchsvoll. Insbesondere das Nutzerverhalten stellte sich als wesentlicher Unsicherheitsfaktor heraus. Lüftungsverhalten, individuelle Temperaturpräferenzen und zeitlich variable Nutzung führen im Realbetrieb zu Abweichungen gegenüber standardisierten Annahmen. Die Simulationen zeigten im Abgleich mit Monitoringdaten eine gute Übereinstimmung im Trend, machten jedoch deutlich, dass eine iterative Kalibrierung notwendig ist, um belastbare Ergebnisse zu erzielen. Die Kopplung von Gebäudehülle, Anlagentechnik und Regelstrategie konnte realitätsnah abgebildet werden, erforderte jedoch eine enge Abstimmung zwischen den beteiligten Fachdisziplinen.

Für die quartiersbezogene Betrachtung wurden aggregierte Modelle entwickelt, die thermische und elektrische Energieflüsse integrieren. Diese Modelle ermöglichten die Analyse unterschiedlicher Transformationsszenarien sowie die Bewertung von Speicherintegration und Lastverschiebung. Dabei zeigte sich, dass die Skalierung vom Einzelgebäude zum Quartier grundsätzlich realisierbar ist, jedoch mit einer deutlichen Zunahme der Modellkomplexität und des Datenbedarfs einhergeht. Lastprofile sind stark witterungs- und nutzerabhängig, wodurch Szenarien stets mit Bandbreiten und Sensitivitätsanalysen betrachtet werden müssen. Die quartiersbezogenen Werkzeuge erwiesen sich insbesondere für strategische Entscheidungsprozesse und Transformationspfade als geeignet, weniger jedoch als unmittelbar anwendungsfertige Standardwerkzeuge für Routineprojekte.

Im Bereich der Regelung und Optimierung wurde unter anderem die modellprädiktive Regelung untersucht. Die simulationsgestützte Analyse zeigte theoretisch signifikante Effizienzpotenziale,

insbesondere im Zusammenspiel von Wärmepumpe, Photovoltaik und Speicher. Gleichzeitig wurde deutlich, dass der praktische Einsatz solcher Regelstrategien hohe Anforderungen an Datenverfügbarkeit, Systemstabilität und Parametrierung stellt. Für eine breite Anwendung im Bestand wäre eine Vereinfachung und Robustheitssteigerung der Algorithmen erforderlich.

Das Monitoring spielte eine zentrale Rolle bei der Validierung der Planungswerkzeuge. Die kontinuierliche Erfassung von Raumklima-, Energie- und Leistungsdaten ermöglichte einen systematischen Vergleich zwischen Simulation und Realbetrieb. Dabei bestätigten sich die grundsätzlichen Trends der Modellrechnungen, gleichzeitig wurden reale Betriebsbesonderheiten sichtbar, die in der Simulation nur eingeschränkt abbildbar sind. Die Auswertung der Messdaten verdeutlichte die Bedeutung einer sorgfältigen Sensorplatzierung sowie eines strukturierten Datenmanagements. Langzeitmessungen erwiesen sich als besonders wertvoll, um saisonale Effekte und Einregulierungsphasen realistisch zu bewerten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die im Projekt eingesetzten Planungswerkzeuge eine wissenschaftlich fundierte und integrative Bewertung komplexer Transformationsprozesse im denkmalgeschützten Bestand ermöglichen. Sie sind leistungsfähig, erfordern jedoch hohe Fachkompetenz, detaillierte Bestandskenntnisse und eine iterative Kalibrierung mit Realbetriebsdaten. Für eine breitere Anwendung in der Praxis erscheint eine stärkere Standardisierung und Vereinfachung der Modellierungsprozesse sinnvoll. Die im Projekt gesammelten Erfahrungen bilden eine belastbare Grundlage für zukünftige Vorhaben und tragen zur Weiterentwicklung integrierender Planungsansätze im Bestand bei.

TEIL V: Akzeptanzbewertung

Die Akzeptanzbewertung im Rahmen des Vorhabens hatte zum Ziel, die Wahrnehmung, Nutzungsbereitschaft und praktische Integration der umgesetzten Maßnahmen durch die beteiligten Akteursgruppen zu erfassen. Im Mittelpunkt standen dabei die Mieterinnen und Mieter der Demonstratorgebäude, die Eigentümervertretung, planende und ausführende Akteure sowie die beteiligten Institutionen im Kontext von Denkmalpflege und Energieversorgung. Neben technischen und energetischen Kriterien wurde insbesondere die Frage untersucht, inwieweit innovative LowEx-Systeme und digitale Steuerungskonzepte im denkmalgeschützten Wohnumfeld als praktikabel und akzeptabel wahrgenommen werden.

Auf Mieterseite zeigte sich, dass Maßnahmen, die mit einer unmittelbar wahrnehmbaren Verbesserung des thermischen Komforts verbunden waren, grundsätzlich positiv bewertet wurden. Die Erhöhung der Oberflächentemperaturen infolge der Hüllertüchtigung sowie eine gleichmäßigere Wärmeverteilung durch angepasste Wärmeübergabesysteme wurden als komfortsteigernd empfunden. Gleichzeitig wurde deutlich, dass Veränderungen in der Anlagentechnik – insbesondere der Übergang zu Wärmepumpensystemen – erklärungsbedürftig sind. Die Akzeptanz war eng mit Transparenz und Information verknüpft. Dort, wo Funktionsweise und Zielsetzung nachvollziehbar kommuniziert wurden, war die Bereitschaft zur Mitwirkung und Anpassung des eigenen Nutzerverhaltens deutlich höher.

Im Bereich der digitalen Komponenten und Smart-Home-Elemente zeigte sich ein differenziertes Bild. Ein Teil der Bewohnerschaft bewertete die erhöhte Transparenz von Energieverbräuchen als positiv und nutzte die bereitgestellten Informationen aktiv zur Anpassung des eigenen Verhaltens. Gleichzeitig wurde deutlich, dass der Mehrwert digitaler Steuerungssysteme stark von der Benutzerfreundlichkeit und der individuellen Technikaffinität abhängt. Komplexe Bedienstrukturen oder unklare Rückmeldungen können die Akzeptanz mindern. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, digitale Lösungen möglichst intuitiv und niedrigschwellig zu gestalten.

Auf Seiten der Eigentümervertretung wurde insbesondere die langfristige strategische Perspektive der Maßnahmen positiv bewertet. Die Verbindung von energetischer Optimierung mit denkmalverträglicher Umsetzung wurde als zukunftsfähiger Ansatz zur Bestandssicherung wahrgenommen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass wirtschaftliche Rahmenbedingungen und regulatorische Entwicklungen einen erheblichen Einfluss auf die Entscheidungsbereitschaft für eine Skalierung haben. Die Demonstratorprojekte wurden als wichtige Referenz betrachtet, um Investitionsentscheidungen künftig auf einer belastbaren Datengrundlage treffen zu können.

Die Zusammenarbeit mit den Denkmalbehörden war von zentraler Bedeutung für die Akzeptanz der baulichen Maßnahmen. Die frühzeitige Abstimmung ermöglichte es, technische Innovationen mit den gestalterischen Anforderungen des Denkmalschutzes in Einklang zu bringen. Dabei zeigte sich, dass transparente Kommunikation und nachvollziehbare bauphysikalische Nachweise wesentlich zur Akzeptanz neuer Lösungen beitragen.

Im praktischen Betrieb wurde deutlich, dass Akzeptanz nicht statisch ist, sondern sich im Verlauf der Nutzung entwickelt. Anfangs bestehende Skepsis gegenüber neuen Systemen nahm mit zunehmender Betriebssicherheit und Erfahrungsgewinn ab. Die Einregulierungsphase spielte hierbei eine wichtige Rolle, da stabile Betriebszustände und verlässliche Funktionalität entscheidend für das Vertrauen in neue Technologien sind.

Zusammenfassend zeigt die Akzeptanzbewertung, dass innovative energetische Maßnahmen im denkmalgeschützten Bestand grundsätzlich auf positive Resonanz stoßen, sofern sie nachvollziehbar kommuniziert, technisch stabil umgesetzt und in ihrer Wirkung erlebbar sind. Komfortverbesserung, Transparenz und Betriebssicherheit stellen zentrale Akzeptanzfaktoren dar. Gleich-

zeitig verdeutlichen die Erfahrungen, dass Informations- und Begleitprozesse integraler Bestandteil energetischer Transformationsprojekte sein müssen. Die soziale Einbettung technischer Innovation erweist sich somit als ebenso bedeutsam wie deren energetische Wirksamkeit.

TEIL VI: Verwertbare Projekt-Erfahrungen

Das Verbundvorhaben hat eine Vielzahl verwertbarer fachlicher, methodischer und organisatorischer Erkenntnisse hervorgebracht, die über den unmittelbaren Demonstrationsrahmen hinaus Bedeutung besitzen. Die Projekterfahrungen sind sowohl für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte als auch für die praktische Umsetzung energetischer Transformationsmaßnahmen im denkmalgeschützten Bestand nutzbar.

Eine zentrale Erkenntnis besteht darin, dass die energetische Optimierung historischer Quartiere nur in einem integrativen Systemansatz sinnvoll bewertet und umgesetzt werden kann. Einzelmaßnahmen entfalten ihre volle Wirkung erst im abgestimmten Zusammenspiel von Gebäudehülle, Niedertemperatur-Anlagentechnik, regenerativer Energieerzeugung, Speicherintegration und intelligenter Regelung. Diese systemische Betrachtungsweise stellt einen wesentlichen Mehrwert des Vorhabens dar und ist auf vergleichbare Quartiere übertragbar.

Von besonderer Relevanz ist die methodische Verzahnung von Simulation und Monitoring. Die Kombination aus thermisch-hygrischer Bauteilbewertung, dynamischer Gebäudesimulation und realer Betriebsdatenerfassung hat sich als geeignet erwiesen, um Planungsannahmen zu validieren und Unsicherheiten zu reduzieren. Die iterative Kalibrierung der Modelle auf Basis gemessener Daten erhöht die Aussagekraft energetischer Prognosen erheblich. Dieses Vorgehen kann als methodischer Standard für zukünftige Transformationsprojekte im Bestand empfohlen werden.

Im Bereich der Technologieentwicklung zeigen die Erfahrungen, dass innovative Komponenten im historischen Umfeld grundsätzlich realisierbar sind, jedoch eine frühzeitige Abstimmung mit denkmalpflegerischen Anforderungen zwingend erforderlich ist. Die Integration regenerativer Energieerzeugung in bestehende Dachlandschaften oder die innenseitige energetische Ertüchtigung historischer Bauteile erfordert nicht nur technische Kompetenz, sondern auch eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit. Diese organisatorische Erfahrung ist für zukünftige Projekte von erheblicher Bedeutung.

Die Umsetzung der Demonstratorgebäude hat darüber hinaus gezeigt, dass Einregulierungsphasen und Betriebsoptimierungen integraler Bestandteil eines erfolgreichen Transformationsprozesses sind. Technische Systeme erreichen ihre geplante Effizienz nicht automatisch mit Inbetriebnahme, sondern bedürfen einer begleitenden Feinjustierung. Diese Erkenntnis ist insbesondere für Wohnungsunternehmen und Energiedienstleister von praktischer Relevanz.

Auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit lassen sich verwertbare Schlüsse ziehen. Die im Projekt ermittelten Kostenstrukturen sind aufgrund des Demonstrationscharakters nicht unmittelbar auf eine Serienanwendung übertragbar, zeigen jedoch klare Kostendegressionspotenziale bei Standardisierung und Skalierung. Für die Wohnungswirtschaft liefern die Projektergebnisse eine belastbare Grundlage zur strategischen Bewertung langfristiger Transformationspfade, insbesondere unter Berücksichtigung steigender CO₂-Kosten und regulatorischer Anforderungen.

Auf Quartiersebene wurde deutlich, dass modellbasierte Szenarienanalysen ein geeignetes Instrument darstellen, um unterschiedliche Ausbaupfade, Versorgungsstrategien und Speicheroptionen vergleichend zu bewerten. Diese Werkzeuge können künftig in kommunalen Wärmeplanungen oder Transformationskonzepten eingesetzt werden. Die entwickelten Modellansätze besitzen somit eine über das Projekt hinausgehende Anwendungsrelevanz.

Nicht zuletzt zeigt das Vorhaben, dass Akzeptanz- und Kommunikationsprozesse eine zentrale Rolle für die erfolgreiche Implementierung innovativer Energiekonzepte spielen. Transparente Information, nachvollziehbare Zielsetzung und erlebbare Komfortverbesserung sind entscheidende Faktoren für die nachhaltige Verankerung technischer Innovation im Wohnumfeld.

Zusammenfassend lassen sich die verwertbaren Projekterfahrungen in drei Ebenen bündeln: methodisch durch die Validierung integrativer Planungs- und Simulationsansätze, technologisch durch die Demonstration LowEx-basierter Systemlösungen im Denkmalbestand sowie organisatorisch durch die erfolgreiche interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Forschung, Wohnungswirtschaft, Industrie und Denkmalpflege. Diese Erfahrungen bilden eine belastbare Grundlage für zukünftige Innovations- und Umsetzungsprojekte und tragen zur Weiterentwicklung energieeffizienter Transformationsstrategien im historischen Bestand bei.

TEIL VII: Zusammenfassung und Gesamtbewertung

Das Verbundvorhaben „Energieeffiziente Wohnsiedlungen durch zukunftsfähige Konzepte für den denkmalgeschützten Bestand – Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen (EnQM)“ hatte zum Ziel, zu zeigen, wie denkmalgeschützte Wohnquartiere durch integrative energetische Maßnahmen technisch belastbar und langfristig transformierbar gestaltet werden können. Im Mittelpunkt stand die Verbindung von energetischer Sanierung, innovativer LowEx-Gebäudetechnik, regenerativer Energieerzeugung sowie intelligenter elektrischer und thermischer Vernetzung auf Gebäude- und Quartiersebene.

Ausgangspunkt war ein historisch wertvoller, jedoch energetisch weitgehend bauzeitlicher Gebäudebestand mit heterogener Anlagentechnik und restriktiven denkmalpflegerischen Randbedingungen. Diese Ausgangslage stellte hohe Anforderungen an die technische Lösungsentwicklung und erforderte eine enge Verzahnung von Bauphysik, Gebäudetechnik, Leistungselektronik, Quartiersmodellierung und Wohnungswirtschaft.

Im Projektverlauf wurden zunächst detaillierte Bestandsanalysen durchgeführt und thermisch-hygrische sowie dynamische Simulationsmodelle entwickelt. Auf dieser Grundlage wurden denkmalverträgliche Sanierungskonzepte erarbeitet und innovative Technologien angepasst oder neu entwickelt. Hierzu zählen insbesondere innenseitige Hochleistungsdämmputzsysteme, Niedertemperatur-Wärmeübergabesysteme, der Einsatz von Wärmepumpentechnologie, photovoltaisch aktivierte Dachsteine sowie gebäude- und quartiersintegrierte Speicher- und Vernetzungslösungen.

Die Maßnahmen wurden exemplarisch in Demonstratorgebäuden umgesetzt und messtechnisch begleitet. Die Energiebilanzierung zeigt eine signifikante Reduktion des Heizwärmebedarfs sowie eine erfolgreiche Umstellung auf ein elektrifiziertes, LowEx-basiertes Energiesystem. Die Monitoringdaten bestätigen die grundsätzliche Belastbarkeit der Simulationsansätze und belegen die technische Funktionsfähigkeit der entwickelten Systemlösungen unter Realbedingungen.

Auf Quartiersebene wurden Transformationsszenarien modelliert, die das Potenzial einer sukzessiven Elektrifizierung der Wärmeversorgung unter Einbindung regenerativer Stromerzeugung aufzeigen. Dabei wurde deutlich, dass die energetische Optimierung nicht isoliert auf Gebäudeebene zu betrachten ist, sondern als systemischer Prozess mit veränderten Laststrukturen, Speicheranforderungen und Regelstrategien.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass energetische Transformation und Denkmalschutz grundsätzlich vereinbar sind, sofern ein integrativer Planungsansatz verfolgt wird. Gleichzeitig wurde deutlich, dass Standardlösungen für Neubauten nur eingeschränkt auf historische Quartiere übertragbar sind und eine differenzierte, objektspezifische Betrachtung erforderlich bleibt.

Wirtschaftlich ist das Vorhaben als Demonstrations- und Entwicklungsprojekt einzuordnen. Die Investitionskosten einzelner Komponenten liegen projektbedingt über marktüblichen Standardlösungen, weisen jedoch bei Skalierung und Standardisierung deutliche Kostendegressionspotenziale auf. Die Ergebnisse liefern eine belastbare Grundlage für zukünftige Investitionsentscheidungen im Bestand.

Neben den technischen Resultaten sind auch die methodischen und organisatorischen Erfahrungen hervorzuheben. Die Kombination aus Simulation, Monitoring und iterativer Optimierung erwies sich als tragfähiger Ansatz zur Absicherung komplexer Transformationsprozesse. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen, Wohnungswirtschaft, Industriepartnern und Denkmalpflege war dabei ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

Zusammenfassend belegt das Vorhaben, dass eine systemische, wissenschaftlich fundierte und denkmalverträgliche energetische Optimierung historischer Wohnquartiere möglich ist. Die entwickelten Konzepte, Modelle und Demonstrationslösungen bilden eine belastbare Grundlage für weitere Skalierungsschritte und tragen zur langfristigen Transformationsfähigkeit des Bestands im Kontext der Klimaschutzziele bei.

TEIL VIII: Gesamtbewertung des Projektes

Das Verbundvorhaben „EnQM – Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen“ ist insgesamt als erfolgreich zu bewerten. Die gesetzten wissenschaftlich-technischen Ziele wurden erreicht und in einzelnen Bereichen weiterentwickelt. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine energetische Optimierung denkmalgeschützter Wohnquartiere unter Beachtung bauphysikalischer, gestalterischer und nutzungsbezogener Randbedingungen grundsätzlich technisch umsetzbar ist. Darüber hinaus wurden belastbare methodische und organisatorische Grundlagen geschaffen, die über den unmittelbaren Demonstrationsrahmen hinaus anwendbar sind.

Im Zentrum des Projekts stand die systemische Betrachtung des Quartiers. Anstelle isolierter Einzelmaßnahmen wurde ein integrativer Ansatz verfolgt, der Gebäudehülle, Niedertemperatur-Anlagentechnik, regenerative Energieerzeugung, Speicherintegration und intelligente Regelung miteinander verknüpft. Diese Vorgehensweise erwies sich als zielführend, da sich die energetische Wirkung einzelner Komponenten erst im abgestimmten Zusammenspiel vollständig entfaltet. Die Energiebilanzierung und das Monitoring belegen, dass signifikante Reduktionen des Heizwärmebedarfs sowie eine substanzielle Verschiebung der Energieflüsse hin zu einem elektrifizierten, LowEx-basierten System erreicht werden können.

Die Demonstratorumsetzung hat gezeigt, dass innovative Technologien – wie innenseitige Hochleistungsdämmputzsysteme, angepasste Wärmepumpenkonzepte oder photovoltaisch aktivierte Dachlösungen – unter denkmalrechtlichen Bedingungen technisch realisierbar sind. Gleichzeitig wurde deutlich, dass der Planungs- und Abstimmungsaufwand im historischen Bestand deutlich höher ist als im Neubau oder bei nicht geschützten Bestandsgebäuden. Die frühzeitige Einbindung der Denkmalpflege sowie die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit erwiesen sich als wesentliche Erfolgsfaktoren.

Methodisch stellt die Verzahnung von Simulation, Monitoring und iterativer Optimierung einen zentralen Mehrwert des Vorhabens dar. Die Kombination aus thermisch-hygrischer Bauteilbewertung, dynamischer Gebäudesimulation und realer Betriebsdatenerfassung ermöglicht eine hohe Planungssicherheit und eine belastbare Bewertung energetischer Effekte. Gleichzeitig wurden die Grenzen modellbasierter Ansätze sichtbar, insbesondere hinsichtlich nutzerbedingter Einflüsse und langfristiger Betriebsdynamiken. Diese Erkenntnisse sind für zukünftige Transformationsprojekte von erheblicher Bedeutung.

In wirtschaftlicher Hinsicht ist das Vorhaben als Forschungs- und Demonstrationsprojekt einzuordnen. Die im Projekt realisierten Maßnahmen sind aufgrund des Prototypencharakters und des zusätzlichen wissenschaftlichen Begleitaufwands nicht unmittelbar als serienreife Marktlösungen zu bewerten. Gleichwohl zeigen die Ergebnisse klare Skalierungspotenziale. Bei Standardisierung, industrieller Optimierung und größerem Anwendungsumfang ist von deutlichen Kostendegressionen auszugehen. Damit liefert das Projekt eine belastbare Entscheidungsgrundlage für weiterführende Investitions- und Umsetzungsstrategien im Bestand.

Auch auf sozialer Ebene ist das Vorhaben positiv zu bewerten. Die Akzeptanz der Maßnahmen war insbesondere dort hoch, wo Komfortverbesserungen und transparente Kommunikation erlebbar wurden. Die Erfahrungen zeigen, dass technische Innovation im Wohnumfeld nur dann

nachhaltig wirkt, wenn sie durch begleitende Informations- und Beteiligungsprozesse unterstützt wird.

Zusammenfassend leistet das Vorhaben einen relevanten Beitrag zur Weiterentwicklung energieeffizienter Transformationsstrategien im denkmalgeschützten Bestand. Es zeigt auf, dass Klimaschutz, Bestandserhalt und technische Innovation vereinbar sind, sofern ein integrativer, wissenschaftlich fundierter Ansatz verfolgt wird. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine belastbare Grundlage für eine mögliche Skalierung im Quartier sowie für die Übertragung auf vergleichbare historische Siedlungsstrukturen. Damit erfüllt das Projekt in hohem Maße die förderpolitische Zielsetzung, innovative Lösungen für eine umweltschonende, zuverlässige und langfristig tragfähige Energieversorgung im Gebäudebestand zu entwickeln und exemplarisch zu validieren.

TEIL IX: Literatur

- [1] Stephan Strauß: „Leitfäden zur Erhaltung und Gestaltung von komplexen Denkmalbeständen: Fallbeispiel „Essen-Margarethenhöhe“ und „Innenstad Rheydt“; Instrumente und Werkzeuge der städtebaulichen Denkmalpflege; LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland
- [2] Christien Hein: „Bauphysikalische Analyse von Innendämmputzsystemen im Hinblick auf ihr thermisch-hygrisches Verhalten“; Bachelorthesis 2018; Universität Stuttgart
- [3] Strauß Fischer Historische Bauwerke GbR und S. Schürmann, *Katalog zur denkmalgerechten Bewirtschaftung der Siedlung Margarethenhöhe*. 2016.
- [4] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, und Institut Wohnen und Umwelt, Hrsg., *Deutsche Wohngebäudetypologie: beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*, 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU, 2015.
- [5] „TABULA WebTool“. Zugegriffen: 10. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://web-tool.building-typology.eu/#bm>
- [6] T. Loga und U. Imkeller-Benjes, „Energiepaß Heizung/Warmwasser - Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem“. März 1997. Zugegriffen: 19. November 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/ephw-1.pdf
- [7] „Stromverbrauch im Haushalt: Durchschnitt & Einspartipps“, Stromspiegel. Zugegriffen: 19. November 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stromspiegel.de/stromkosten/stromverbrauch-im-haushalt/>
- [8] „Vektorlayereigenschaften“, QGIS Benutzerhandbuch. Zugegriffen: 18. Dezember 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://docs.qgis.org/2.14/de/docs/user_manual/working_with_vector/vector_properties.html
- [9] „Lastprofile für Wohngebäude | pvspeicher.htw-berlin.de“. Zugegriffen: 9. November 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://pvspeicher.htw-berlin.de/veroeffentlichungen/daten/lastprofile/>
- [10] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 4655: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“. Beuth Verlag GmbH, Mai 2008.
- [11] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, „Ortsgenaue Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse“. Zugegriffen: 2. Dezember 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html?nn=436654¬-First=true&docId=1595620>
- [12] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 3807“. Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN V 18599-10“. Beuth Verlag GmbH, Februar 2007.
- [14] „TransiEnt: Dynamic simulation of integrated energy systems“. Zugegriffen: 2. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tuhh.de/transient-ee/welcome>
- [15] J. Benthin u. a., „IntegraNet - Integrierte Betrachtung von Strom-, Gas- und Wärmesystemen zur modellbasierten Optimierung des Energieausgleichs- und Transportbedarfs innerhalb der deutschen Energienetze“, Oberhausen/Essen, Abschlussbericht, März 2020. Zugegriffen: 20. August 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://integranet.energy/wp-content/uploads/2020/04/IntegraNet-Abschlussbericht_V1.1.pdf

-
- [16] D. A. Kemmler *u. a.*, „Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Jan. 2017.
- [17] „Lastprofile und Klimazonen Strom bei der Westnetz GmbH“. Zugegriffen: 3. September 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://iam.westnetz.de/fuer-unsere-partner/fuer-lieferanten-und-messstellenbetreiber/bilanzierung/lastprofile-und-klimazonen-strom>
- [18] „Solarpotenzialkataster“, tetraeder.solar. Zugegriffen: 14. November 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://solar.tetraeder.com/de_v2/kommunale-daten/spk/
- [19] tetraeder.solar, „Gebäudedatensatz“.
- [20] J. Figgner, D. Haberschusz, K.-P. Kairies, O. Wessels, B. Tepe, und D. U. Sauer, „Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarspeicher 2.0“, Institut für Stromrichter-technik und Elektrische Antriebe RWTH Aachen, 2018. Zugegriffen: 9. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bves.de/wp-content/uploads/2018/07/Speichermonitoring_Jahresbericht_2018_ISEA_RWTH_Aachen.pdf
- [21] A. Rosenkranz, „Volllast und Teillast einer Heizung“, Heizung.de. Zugegriffen: 8. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://heizung.de/heizung/wissen/volllast-und-teillast-einer-heizung/>
- [22] DIN Deutsches Institut für Normen e.V., „DIN EN 15450: Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen; Deutsche Fassung EN 15450:2007“. Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [23] „Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung“. Zugegriffen: 18. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.delta-q.de/wp-content/uploads/fernwaermestudie.pdf>
- [24] „Pyomo“, Pyomo. Zugegriffen: 11. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pyomo.org>
- [25] „CAMS Radiation Service“, Atmosphere Monitoring Service. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>