

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Projekt IMoSUB

Integriertes Monitoring:

Versorgung – Nutzer – Bauteil

Integrated Monitoring: Supply – User – Building Construction

Akronym:	IMoSUB
Förderkennzeichen:	03ET1287A
Laufzeit:	01.05.2015 bis 31.10.2017
Laufzeitverlängerung:	31.12.2017

Autoren:	Dipl.-Ing. Andreas Söhnchen (Projektleitung) Dr. Ing. Karin Rühling Dipl. Ing. Luise Umbreit Dipl.-Ing. Martin Rhein Dipl.-Math. Anja Matthees
----------	--



Technische Universität Dresden
Institut für Bauklimatik (IBK)
Institut für Energietechnik (IET)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Vorwort

In ihrem Energiekonzept hat die Bundesregierung 2010 Leitlinien für den Weg in das Zeitalter der Erneuerbaren Energien beschrieben. Als zentrale Ziele wurden dabei die Senkung des Wärmebedarfs im Gebäudebestand gegenüber 2008 um 20% bis 2020, die Ausschöpfung der Energiepotenziale in privaten Haushalten und im öffentlichen Bereich sowie die Verdopplungsrate der energetischen Sanierungsrate auf 2% zur Erreichung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2050 bezeichnet. Angesichts der Tatsache, dass fast 40% des Endenergiebedarfs in Deutschland auf den Gebäudebereich entfallen (2010) wird deutlich, dass der energieeffizienten Sanierung des Gebäudebestandes bei der Umsetzung der Ziele des Energiekonzeptes entscheidende Bedeutung zukommt.

In privaten Haushalten wird nach wie vor ein hoher Anteil der verbrauchten Endenergie zum Heizen der Räume aufgewendet. Im Jahr 2015 waren dies mehr als zwei Drittel des Gesamtenergiebedarfes. Die Auswirkungen auf den Ausstoß von CO₂ und Treibhausgasen werden umso deutlicher, wenn die Energiequellen in die Betrachtung einbezogen werden. So wurde auch 2015 mehr als die Hälfte der in privaten Haushalten benötigten Energie auf der Basis fossiler Brennstoffe bereitgestellt.

Einen Ansatzpunkt zur Verbesserung der Situation stellt die zunehmende Verwendung erneuerbarer Energien dar. Allerdings resultieren hier technische Herausforderungen für die Energieversorger, insbesondere im Hinblick auf die Netzauslastung und –stabilität. Dezentralen Lösungen den Vorzug zu geben, bedeutet wiederum einen vergleichbar hohen technischen Aufwand und immer wiederkehrende Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten im dezentralen Raum.

Eine erfolgversprechende Strategie zur Reduzierung des Heizenergiebedarfes bietet, im Sinne der „Ursachenbekämpfung“, die Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle. Angesichts der Vielzahl von Gebäuden im Bestand – teilweise unter Denkmalschutz stehend – kommen dabei immer häufiger Innendämmösungen zum Einsatz. Die große Vielfalt der am Markt befindlichen Innendämmsysteme stellt Bauherren, Architekten und Ingenieure allerdings regelmäßig vor die Frage, ob diese Lösungen in der versprochenen Weise funktionieren und welches Einsparpotenzial erschlossen werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Gebäudeenergiebedarfes ist der Einsatz effizienter Haustechnik und alternativer Versorgungskonzepte in den Bereichen Heizung und Trinkwarmwasser, sowie der Einsatz einer Lüftungsgerätechnik mit Wärmerückgewinnungseinrichtungen. Für den Teil der Raumheizung steht die Frage hinsichtlich geeigneter Varianten für den Einsatz von Flächenheizungen (auf Niedrigtemperaturbasis) – insbesondere vor dem Hintergrund der Anforderungen an eine barrierefreie Gestaltung von Wohngebäuden und gestalterischer Randbedingungen.

Das Potenzial verschiedener Lösungsansätze zur Energiebedarfsreduzierung kritisch zu untersuchen ist eine wesentliche Aufgabe des dieser Dokumentation zu Grunde liegenden Projektes.

INHALTSVERZEICHNIS

I. Kurzdarstellung	5
I.1 Aufgabenstellung	5
I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben	6
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
4.1 Innendämmung (denkmalgeschützter) Bauwerke	8
4.2 Hygrothermische Simulationsmodelle zur Bauteilsimulation	8
4.3 Gebäudesimulationsmodelle	9
4.4 Konzepte zur Wärme- und Trinkwasserversorgung von Wohnbauten	9
4.5 Verwendung von Deckenstrahlheizungen im Wohnungsbau	10
4.6 Einrichtungen zur Wohnungslüftung	10
4.7 Gerätetechnik zur Erfassung bauphysikalischer Messgrößen und TGA-relevanter Verbrauchsdaten	10
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
II. Eingehende Darstellung	12
II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	12
1.1 Vorhabensziele	12
1.2 Bestandsanalyse / Ausgangssituation	13
1.3 Beschreibung des Messkonzepts	21
1.4 Dokumentation erfasster Messdaten	34
1.5 Bewertung der Sanierungsmaßnahmen und Vergleich von Aufwand und Nutzen energetischer Sanierungsoptionen	91
1.6 Wissenstransfer in die Praxis	96
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	97
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	98
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	99
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	99
4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	99
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	99
II.5 Fortschritt Dritter während der Laufzeit	101

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	102
III. Anlage (1) – Erfolgskontrollbericht	103
III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen	103
III.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens / erreichte Nebenergebnisse / wesentliche Erfahrungen	104
III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans	104
III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	104
III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer der Projektergebnisse	104
III.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	105
Abbildungsverzeichnis	106
Anlagenverzeichnis.....	110
Literaturverzeichnis	111
Liste der verwendeten Abkürzungen	112

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Gesamtziel des Forschungsprojektes ist es, aufbauend auf den bereits erreichten Erkenntnissen und Vorgehensweisen, einen substanziellen Beitrag zur Bereitstellung einer belastbaren zeitlich hoch aufgelösten Datenbasis für die Planung von Gebäudeenergiekonzepten im Bestand zu leisten. Das betrifft besonders die Schwerpunkte Nutzerverhalten, Baukonstruktion und Anlageverhalten.

Ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens besteht in der vergleichenden Analyse der verschiedenen Sanierungskonzepte der denkmalgeschützten Mehrfamilienhäuser mit Blick auf Investitions- und Betriebskosten. Bisher gibt es dazu sehr wenige aktuelle Untersuchungen, die insbesondere die Wirkungen der gebäudeseitigen Sanierungsmaßnahmen nach neuesten EnEV-Vorschriften sowie die Marktpreisentwicklung beim Endkunden berücksichtigen. Durch die Integration der technologischen und der monetären Komponenten soll ein höheres Akzeptanz- und Multiplikationspotenzial für Sanierungslösungen sowohl für denkmalgeschützte Gebäude als auch für Wohngebäude im Bestand geschaffen werden.

Die Beurteilung des energetischen Einsparpotenzials der denkmalgeschützten Gebäude, als Beitrag zur Senkung der Betriebskosten und der CO₂-Emissionen muss auch die Beurteilung der Denkmalverträglichkeit dieser Maßnahmen wie den Verlust an historischer Bausubstanz, Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes und Reversibilität der Maßnahme miteinschließen. Die Ergebnisse eines Abwägungsprozesses sind einander gegenüber zu stellen, um das Für und Wider anschaulich aufzuzeigen und die Formulierung von Leitlinien zu ermöglichen.

Im Ergebnis steht einerseits die Erweiterung der vorhandenen Informationsstruktur der Monitoring-Datenbank im Förderprogramm EnOB. Zusätzlich werden im Rahmen des Wissenstransfers die Ergebnisse in den Arbeitsprozess der Entscheidungsträger auf kommunaler Ebene überführt, um die örtlichen Verwaltungsstrukturen bei der Strategieentwicklung für Versorgungskonzepte auf Quartiers-, Stadtteil- und Gemeindeebene zu unterstützen. Wesentliche Schwerpunkte der Projektarbeit sind demnach:

- die Sammlung von Informationen zur Vorhersage zeitlicher Verläufe von Lastkurven in den Versorgungssystemen (Input für Anlagensimulation),
- die Erhebung und Bereitstellung von Eingangsdaten zur Validierung von Planungswerkzeugen (Input für Gebäude- und Bauteilsimulation),
- die Vergleichende Analyse und Bewertung verschiedener Sanierungskonzepte anhand der gemessenen Verbrauchswerte und
- die Beurteilung des energetischen Einsparpotenzials im Bereich denkmalgeschützter Wohngebäude anhand der erfassten Verbrauchsdaten.

I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Wesentliche Grundlagen für das Vorhaben wurden im Rahmen eines vom BMWi unter dem Förderkennzeichen **03ET1173** geförderten Vorgängerprojektes geschaffen. Das Vorhaben wurde aufgrund des Wegfalls wesentlicher projektspezifischer Randbedingungen im Jahr 2014 vorzeitig beendet.

Im Rahmen dieses Vorhabens erfolgte die umfassende energetischen Sanierung dreier Gebäude eines Gebäudeensembles unter besonderer Berücksichtigung denkmalpflegerischer Anforderungen und einer barrierefreien Gestaltung. Wegen der angespannten finanziellen Situation bei der Bauherrin, wurden abweichend vom ursprünglichen Ansatz unterschiedliche Sanierungskonzepte umgesetzt. Dies ermöglicht in einem gewissen Rahmen einen Vergleich verschiedener – mehr oder weniger ambitionierter – Herangehensweisen zur energetischen Ertüchtigung unseres Gebäudebestandes.

Begleitend zu den Bauarbeiten erfolgte die Vorrüstung entsprechender Messeinrichtungen durch die TU Dresden und Kabeltrassen zur Vernetzung durch die Max-Zöllner-Stiftung. Diese Vorrüstungen konnten im Folgeprojekt weitgehend genutzt werden, so dass die Kosten für das hier umgesetzte komplexe integrierte Monitoring ausgesprochen moderat gehalten werden konnten.

Beide am Projekt beteiligten Institute bearbeiteten in der Vergangenheit Monitoring-Projekte unterschiedlicher Ausprägung, um schrittweise eine Datenbasis zur Analyse und Bewertung der unterschiedlichsten Fragestellungen im Zusammenhang mit den energetischen Zielstellungen der Politik und Wirtschaft aufzubauen.

Wesentliche Anforderungen an die zu gewinnenden Daten resultierten letztendlich daraus, dass in beiden Instituten Softwarelösungen zur Simulation komplexer fachspezifischer Zusammenhänge entwickelt, validiert und angewendet werden. Die gewonnenen Daten fließen demnach unmittelbar in laufende und künftige Forschungsvorhaben ein und stehen ebenso für die universitäre Ausbildung zur Verfügung.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben wurde durch die beiden Institute der TU Dresden mit Unterstützung durch die Max-Zöllner-Stiftung planmäßig und erfolgreich durchgeführt. Unmittelbar nach Projektstart erfolgte die Anpassung des Messkonzeptes an die baulichen Gegebenheiten unter Berücksichtigung der Projektziele und des Projektbudgets.

Im Rahmen dieser Anpassungen stellte die Entwicklung und Erprobung geeigneter Komponenten zur Erfassung der notwendigen Messdaten einen wesentlichen Schwerpunkt dar. Der ursprüngliche Ansatz, welcher im Rahmen des erwähnten Vorgängerprojektes entwickelt wurde, musste bereits im Rahmen der Projektantragstellung verworfen werden, da die dafür notwendigen Mittel in Höhe von ca. 250.000 Euro (Unterauftrag zur Erstellung des Monitoring-Systems) nicht in die Kalkulation eingestellt werden konnten. Der vollständig überarbeitete Systemansatz basiert daher auf dem Einsatz alternativer, kostengünstiger Sensoren und Systemkomponenten und einem vollständig überarbeiteten Vernetzungskonzept.

Neben dem Systemkonzept für die Mess- und Anlagentechnik vor Ort stellte die Entwicklung / Anpassung der serverseitigen Strukturen und Formate zur Datenablage, -verwaltung, -verarbeitung und zur Datenbereitstellung einen weiteren Arbeitsschwerpunkt dar. Zur Bewältigung der großen anfallenden Datenmengen (während der Projektlaufzeit fielen ca. 20 GB Rohdaten an) wurden verschiedene Lösungen zur Datenhaltung (Datenbank / Serverseitige Ablagestrukturen, Rechte- und Rollenverteilung etc.) in Betracht gezogen. Dabei stand die Wahrung der datenschutzrechtlichen Belange stets im Zentrum der Überlegungen.

Nach Fertigstellung des Systemkonzeptes erfolgte die Beschaffung der notwendigen Komponenten, der Integrationstests in den Laboren der beteiligten Institute, die Herstellung der einzelnen Systemkomponenten und der Aufbau und die Inbetriebnahme des Gesamtsystems in den Gebäuden vor Ort. Hardwareseitig war dieser im Wesentlichen im Oktober 2015 abgeschlossen – es wurden lediglich die M-Bus Schnittstellen an den Stromzählern nachgerüstet sowie kleinere Ergänzungen vorgenommen. Softwareseitig waren anfangs noch Tests und Anpassungen an der Systemschnittstelle zum B-Bus-Master erforderlich, so dass eine vollständige Erfassung aller Daten im Frühjahr 2016 beginnen konnte.

Ab diesem Zeitpunkt erfolgte eine permanente Datenübernahme (tägliche Datenübertragung per Mobilfunk) sowie die Überwachung der Datenqualität und der Funktionsstabilität des Gesamtsystems. Während der gesamten Projektlaufzeit wurden Algorithmen zur Auswertung und Aufbereitung der erfassten Daten entwickelt, erprobt und verfeinert. Ziel war die Datenbereitstellung zur Verwendung im wissenschaftlichen Betrieb, zur Kalibrierung von Simulationstools und zur Weiterverwendung (in anonymisierter Form) als Input für die Planung / Dimensionierung.

Im Rahmen flexibler Wartungszyklen erfolgte die Rückkopplung zur Max-Zöllner-Stiftung und zu den Bewohnern der Gebäude. Dabei wurden Fragen rund um das Thema Nutzerverhalten angesprochen und Hinweise zum ressourcenschonenden Umgang mit Heizenergie erörtert.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Auf dem Gebiet des energetischen Gebäudemonitorings wurden im Rahmen der Förderlinie „Forschung für energieoptimiertes Bauen“ (EnOB) Standards etabliert. Die Kombination aus Gebäude- und Bauteilmonitoring in Verbindung mit der Simulation birgt für die energetische Betriebsoptimierung ein großes Potenzial. Vollständige Simulationen des energetischen Verhaltens baugleicher Gebäude mit unterschiedlichen Innendämmsystemen, einschließlich der Baukonstruktion und der Raumklimazustände, die mit Monitoringdaten abgeglichen sind und sich speziell mit Wohngebäuden befassen, gibt es zum Projektstart kaum.

Im Rahmen des geplanten Gebäudemonitorings erfolgt daher die vollständige Erfassung des Warm- und Kaltwasserverbrauchs sowie des Heizwärmebedarfes für insgesamt 28 Wohneinheiten in drei, in der äußeren Kubatur und Nutzung sehr ähnlichen, Gebäuden. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen ist die detaillierte Betrachtung des zeitlichen Anfalls des Energiebedarfes. Die Gleichzeitigkeit spielt eine entscheidende Rolle zur Dimensionierung von Wärmeversorgungssystemen.

4.1 Innendämmung (denkmalgeschützter) Bauwerke

Bei der Sanierung von Bestandsgebäuden hat der Einsatz von Innendämmsystemen in den zurückliegenden Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Der Markt für Innendämmsysteme und die ergänzenden Systemkomponenten (Befestigungselemente, spezielle Steckdosen, Abdichtungssysteme etc.) befindet sich im Wachstum – die Systemvielfalt nimmt permanent zu.

Bei der Verwendung von Innendämmsystemen sind allerdings zusätzliche Randbedingungen zu berücksichtigen. So kühlt beispielsweise die Bestandskonstruktion hinter der Innendämmung stärker aus – in einigen Bereichen kann Kondensat anfallen. Besonderes Augenmerk ist auf die Ausbildung konstruktiver Details zu legen, da diese mit zunehmender Dämmstärke an Bedeutung gewinnen.

Dieser Umstand führt teils zur Verunsicherung bei Bauherren, Architekten und Planern, ob und in welcher Weise eine Innendämmung sicher planbar und umsetzbar ist. Die bestehenden Bedenken sollten durch die Durchführung und Dokumentation von Demonstrationsvorhaben ausgeräumt werden.

4.2 Hygrothermische Simulationsmodelle zur Bauteilsimulation

Hochspezialisierte Simulationstools, zur Durchführung hygrothermischer (wärme- und feuchte-technisch gekoppelter) Bauteilsimulationen werden seit mehr als 20 Jahren entwickelt und gewinnen zunehmend an Bedeutung – nicht ausschließlich im wissenschaftlichen Bereich, sondern ebenso im planerischen Umfeld. Die Vorgaben hinsichtlich der Eigenschaften derartiger Simulationssoftware werden in der DIN EN 15026 sowie im WTA-Merkblatt 6-2 beschrieben. Unter Ansatz dynamischer Klimarandbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte der angrenzenden Luftschichten sowie Strahlung, Regen, und Luftdruck) können

sowohl eindimensionale Wandkonstruktionen ebenso wie komplexe konstruktive 2D-Details realitätsnah abgebildet werden. In einem nächsten Entwicklungsschritt soll die Simulation 3dimensionaler Bauteile ermöglicht werden.

4.3 Gebäudesimulationsmodelle

Mit der zunehmenden Integration von Planung, Errichtung und Betrieb von Gebäuden rückt das Building-Information-Modeling (BIM) weiter in den Fokus. Bereits heute werden auf der Grundlage der Planungsunterlagen detaillierte Gebäudemodelle erstellt, welche sich nicht auf die Beschreibung der Konstruktion beschränken, sondern einen komplexen Ansatz darstellen, der neben der thermischen Beschreibung der Gebäudehülle insbesondere die Randbedingungen (nutzerseitig, versorgungstechnisch) mit abbilden soll.

Neben klassischen Gebäudesimulationsumgebungen wie EnergyPlus und nutzerfreundlichen Eingabeschnittstellen wie DesignBuilder werden zunehmend auch durch Softwarehersteller, die sich zunächst auf die Umsetzung der Normen und Standards im Sinne von Bilanzierungsverfahren konzentrierten, stundenbasierte Simulationstools entwickelt.

Das IBK unterhält mit dem Simulationstool NANDRAD eine moderne Gebäudesimulationsplattform für die dynamische Bewertung der Energieeffizienz eines Gebäudes. Sie ist speziell dafür entwickelt worden, besonders komplexe und große Gebäude effizient berechnen zu können sowie die dafür notwendige Datenmenge verwalten zu können. Gleichzeitig weisen die integrierten physikalischen Modelle eine hohe Detailtreue auf, welche für die dynamische Beschreibung des Gebäudes zweckmäßig sind.

Zur Bewertung der Simulationsergebnisse sind detaillierte Messdaten, welche die hygrothermischen Randbedingungen ebenso wie die Energieverbrauchsdaten in zeitlich hoher Auflösung beinhalten unerlässlich. Die hierfür erforderliche Datenbasis als Grundlage für Vergleichsrechnungen wird durch die Arbeiten im vorliegenden Projekt deutlich verbessert.

4.4 Konzepte zur Wärme- und Trinkwasserversorgung von Wohnbauten

Insbesondere Überlegungen im Bereich der Trinkwasserhygiene führten in den letzten Jahren dazu, dass die herkömmlichen zentralen Trinkwarmwasserspeicher durch zentrale bzw. dezentrale Komponenten zur „Trinkwassererwärmung auf Abruf“ abgelöst werden. Dabei existieren verschiedene Ansätze von der dezentralen Trinkwassererwärmung in den Wohneinheiten mittels Wohnungsanschlussstationen bis hin zur zentralen Trinkwassererwärmung im Durchflussprinzip. Zum Projektbeginn liegen nur wenige Untersuchungen zur Effizienz der unterschiedlichen Systeme vor. Im vorliegenden Vorhaben werden drei Verfahren erprobt (Haus 1: Wohnungsanschlussstation, Haus 2: zentrale Trinkwassererwärmung mittel Frischwasserstation im Durchflussprinzip Haus: 3 zentraler Warmwasserspeicher / Speicher-Lade-Prinzip). Im Rahmen des Projektes wird die vergleichende Bewertung der Systemvarianten angestrebt.

4.5 Verwendung von Deckenstrahlheizungen im Wohnungsbau

Klassische Formen der Deckenstrahlheizungen wurden in der Vergangenheit vor allem im industriellen Bereich eingesetzt (Schwarzlichtstrahler, gas- oder elektrobetrieben). Deren Vorteil liegt vor allem darin, keine physischen Heizelemente im Aktionsbereich der Nutzer zu benötigen und eine gleichmäßige Wärmeverteilung auf großen Flächen zu ermöglichen. Für die Nutzung im Büro- und im Wohnbereich wurden Flächenheizelemente für den Einsatz im Deckenbereich ähnlich zu Fußboden- oder Wandflächenheizungen entwickelt. Auf Grund der geringen Raumhöhen muss die Wärmeabgabe vollflächig und auf einem niedrigen Temperaturniveau erfolgen. Umfassende Untersuchungen zur Nutzer-Akzeptanz (Behaglichkeit) beim Einsatz solcher Deckenstrahlheizungen sind zum Projektbeginn nicht bekannt.

4.6 Einrichtungen zur Wohnungslüftung

Mit der Herstellung immer dichter Gebäudehüllen gewinnt die Gewährleistung des hygienischen Mindestluftwechsels an Bedeutung. Da die Infiltrationsströme häufig sehr gering sind, reichen sie nicht aus, um den Luftwechsel zum Feuchteschutz zu realisieren. Aus diesem Grund kommt das Prinzip der freien Wohnungslüftung nicht in Frage – es sind mechanische Lüftungseinrichtungen vorzusehen. Auch hier wird zwischen zentralen und dezentralen Lösungen unterschieden. Eine umfassende (herstellernerneutrale) Bewertung der beiden Ansätze ist nicht bekannt.

Im vorliegenden Projekt wurden in einem Gebäude wohnungsweise Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnungseinrichtung eingesetzt. Die beiden anderen Gebäude verfügen jeweils über ein zentrales Lüftungsgerät zur Absaugung der Fortluft aus Bädern und Küchen. Die Zufuhr der Zuluft erfolgt in diesen beiden Gebäuden über Außenluftdurchlasselemente in den Fensterrahmen (ADL). Im Rahmen des Projektes werden beide Varianten gegenübergestellt.

4.7 Gerätetechnik zur Erfassung bauphysikalischer Messgrößen und TGA-relevanter Verbrauchsdaten

Beide am Projekt beteiligten Institute übernehmen seit vielen Jahren vielfältige fachspezifische Messaufgaben im wissenschaftlichen Betrieb. Dabei konzentrierte sich das IBK auf die für die Baukonstruktion relevanten Messgrößen. Beim IET hingegen steht die Erfassung von Wärme- / Energieströmen, Systemtemperaturen und Systemverlusten verschiedener Versorgungssysteme im Vordergrund. Hinsichtlich der verwendeten Messtechnik gibt es naturgemäß Schnittmengen aber auch systemfremde Messlösungen, die zur Realisierung spezieller Messaufgaben notwendig werden. Die Integration der beiden Systemwelten war bislang nicht vordergründige Aufgabe und wird vollständig erstmals mit dem vorliegenden Projekt realisiert.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die interdisziplinäre Projektbearbeitung erfolgte in enger Abstimmung zwischen dem Institut für Bauklimatik und dem Institut für Energietechnik der TU Dresden. Die Gesamtkoordination oblag dabei dem Institut für Bauklimatik.

Die Max-Zöllner-Stiftung als Bauherrin bzw. Eigentümerin der Immobilien wurde über einen Kooperationsvertrag in das Verbundprojekt eingebunden und agierte als Ansprechpartner vor Ort. Um die Verfügbarkeit des Projektverantwortlichen der Stiftung über die gesamte Projektlaufzeit zu gewährleisten, wurde durch die TU Dresden ein entsprechender Unterauftrag mit einem Umfang von 18.200,- Euro (brutto) erteilt.



Projektorganisation – Zusammenarbeit mit der Max-Zöllner-Stiftung

Da im Verlauf des Projektes das Gebäude 3 durch die Max-Zöllner-Stiftung an die GW-Immobilienverwaltung GmbH veräußert werden musste, ergab sich darüber hinaus die Notwendigkeit, Abstimmungen mit dem Management der Gesellschaft zur Weiterführung des Projektes in diesem Gebäude zu führen. Die Gespräche verliefen erfolgreich, so dass die kontinuierliche Datenerfassung auch in diesem Gebäude weitergeführt werden konnte. Die Wohnungen wurden anschließend an Einzeleigentümer (somit Entstehung einer Eigentümergemeinschaft) weiterverkauft. Als Ansprechpartner vor Ort (Sicherung des Zugangs zur Messtechnik etc.) stand von diesem Zeitpunkt an die Adrian Immobilienverwaltungsgesellschaft mbH zur Verfügung.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

1.1 Vorhabensziele

In Deutschland gibt es laut Statistischem Bundesamt 2011 ca. 18 Mio. Wohngebäude und ca. 1.5 Mio. Nichtwohngebäude. Von den rund 40 Mio. Wohnungen in Deutschland befinden sich mindestens 75% in Gebäuden, die vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung (WSchV) von 1977 errichtet wurden [Statistisches Bundesamt 2008]. Sie weisen somit, falls bisher an diesen Gebäuden keine Modernisierungsmaßnahmen vorgenommen worden sind, einen aus energetischer Sicht schlechten Standard auf. Innerhalb eines Gesamtbestands von ca. 19,5 Mio. baulichen Anlagen im Bundesgebiet sind etwa 3-5% als Kulturdenkmale erfasst (Schätzungen 2002). In Sachsen liegt dieser Prozentsatz deutlich höher.

Im Rahmen der Forschungsinitiative EnOB wird eine Vielzahl von Vorhaben im Bereich Bürogebäude, Schulen und andere Nichtwohngebäude umgesetzt, in denen speziell angepasste Vorgaben für den Gebäudebetrieb gemacht werden können (Heizung, Lüftung, Verschattung etc.), Wohngebäude hingegen blieben bislang weitgehend unterrepräsentiert.

Im Rahmen des umgesetzten Gebäudemonitorings erfolgt die vollständige Erfassung des Warm- und Kaltwasserverbrauchs sowie des Heizwärmebedarfes für insgesamt 28 Wohneinheiten in drei in der äußeren Kubatur und Nutzung sehr ähnlichen Gebäuden. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen ist die detaillierte Betrachtung des zeitlichen Anfalls des Energiebedarfes. Die Gleichzeitigkeit spielt eine entscheidende Rolle zur Dimensionierung von Wärmeversorgungssystemen. Die Bereitstellung belastbarer Daten für parallel durchgeführte F&E-Vorhaben im Bereich der Versorgungsnetzsimulation ist wesentliches Ziel des Projektes.

Das Verhalten der Nutzer hat einen großen Einfluss auf das energetische Verhalten von Gebäuden. Die Erfassung des Nutzerverhaltens bietet die Möglichkeit, Nutzermodelle zu erstellen und zu validieren. Diese Modelle sind für die Generierung von Eingabedaten für die Simulation geeignet. Das Monitoring des Nutzerverhaltens sowie des Innenklimas ist für die energetische Optimierung von Gebäuden unter Beachtung von Behaglichkeitsaspekten von zukunftsweisender Bedeutung.

Das bauteilbezogene Monitoring hat das bauphysikalische Verhalten innengedämmter Baukonstruktionen unter verschiedenen Randbedingungen zum Gegenstand. Gemessen werden die Temperaturen und die relativen Luftfeuchten in verschiedenen Bereichen der Konstruktion sowie innerhalb und außerhalb des Gebäudes. Die erfassten Messdaten dienen zum ei-

nen als realistische Randbedingung für instationäre Bauteilsimulationen und können ferner zur Validierung der Simulationsergebnisse herangezogen werden. Ziel ist die Qualifizierung von Verfahren zur numerischen Bauteilsimulation als Nachweisverfahren für das Bauwesen. Aus wissenschaftlicher Sicht können durch den Einsatz dynamischer Nachweisverfahren Optimierungspotenziale erschlossen und Grenzen für den Einsatz von innengedämmten Konstruktionen besser aufgezeigt werden als mit den herkömmlichen Nachweisverfahren.

Im Rahmen geförderter Monitoring-Projekte kommen verschiedene Datenbankumgebungen und Auswertungsalgorithmen zum Einsatz. Das vorgeschlagene Projekt hat zum Ziel, die Vorgänge zum Datenhandling (Erfassung, Übertragung, Plausibilisierung und Weiterverarbeitung) weitgehend zu automatisieren bzw. durch Softwarekomponenten zu unterstützen. Die Daten werden in einer Datenbank strukturiert abgelegt und für verschiedene Anwendungen (Gebäudesimulation, Bauteilsimulation, Netzsimulation) aufbereitet. Somit wird eine breite Datenbasis über geeignete Schnittstellen aufbereitet und für vorhandene und derzeit in Entwicklung befindliche Softwarelösungen zur Verfügung gestellt.

1.2 Bestandsanalyse / Ausgangssituation

1.2.1 Beschreibung der räumlichen Einordnung und der Beschaffenheit der Gebäude

Insgesamt werden drei um 1925 errichtete und vollständig sanierte Gebäude untersucht (vgl. Abbildung 1). Sie weisen folgende gemeinsame Merkmale auf:

- Die Gebäude besitzen eine ähnliche äußere Kubatur.
- Es handelt sich um Mehrfamilienhäuser, die Anzahl der Haushalte ist vergleichbar.
- Es herrschen gleiche Klimarandbedingungen für das gesamte Gebäudeensemble.
- Anforderungen bzgl. Denkmalschutz und Barrierefreiheit sind zu berücksichtigen.

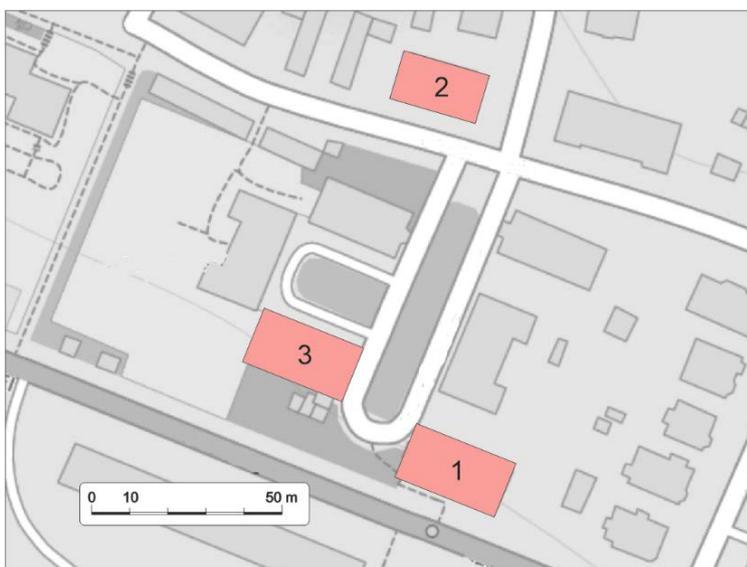


Abbildung 1 Lageplan der Gebäude im Untersuchungsgebiet

1.2.2 Grundsätzliches zum Sanierungsumfang

Die drei Gebäude wurden vollständig saniert. Die Sanierung umfasste die energetische Erhöhung der Gebäudehülle (Austausch der Fenster, Innendämmung der Außenwände, Dämmung der obersten Geschossdecke und der Kellerdecke) sowie die vollständige Erneuerung der TGA (Heizung, Trinkwassererwärmung, und Lüftung). Für die Lüftung kamen teilweise Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz, alternativ wurde eine zentrale Abluftanlage mit dezentralen Zuluftöffnungen (REGEL-air®) installiert. Ferner wurden die Elektroinstallation und sämtliche Trink- und Abwasserleitungen erneuert.

Die Wohnungen sind mit einem hochwertigen Parkettboden ausgestattet. Die Treppen wurden aufbereitet. Durch die Installation eines Fahrstuhls wird die Barrierefreiheit realisiert. Es wurde für jedes der drei Gebäude, insbesondere aus Investitionskostenüberlegungen heraus, ein eigenes Sanierungskonzept erarbeitet und umgesetzt. Somit können durch das Monitoring unterschiedliche Lösungen miteinander verglichen werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt Ansichten der Gebäude vor und nach der Sanierung.



Abbildung 2 Ansichten der Gebäude vor und nach der Sanierung

1.2.3 Sanierungskonzept Gebäude 1

Im Sinne einer zukünftig wünschenswerten Niedertemperatur-Wärmeversorgung handelt es sich bei Haus 1 um die innovativste, aber zugleich auch Investitionskosten-intensivste Sanierungsvariante. Der prognostizierte flächenbezogene Wärmebedarf ist der geringste im Vergleich der drei Gebäude. Erreicht wurde dies durch:

- die Dämmung der Außenwände mit einer 70 mm starken Innendämmplatte (dem TecTem®-Insulation-Board),
- die Verwendung integrierter Deckenstrahl- und Wandheizungen bei gleichzeitig geringen Raumhöhen,
- den Einbau autarker Lüftungsgeräte (wohnungswise kontrollierte Zu- und Abluftregelung mit Wärmerückgewinnung)
- die Installation KaMo-Wohnungsanschlussstationen (WAST) zur wohnungsweisen Trinkwassererwärmung im Durchflussprinzip und zur Raumheizung,
- die Verwendung einer Brennwerttherme mit 400 l – Heizungspufferspeicher und
- eine Niedertemperatur-Fahrweise 60/40 °C (Auslegung und Betrieb) für die zentrale Heizungsanlage.

Die nachfolgende Abbildung skizziert den prinzipiellen Aufbau der Heizzentrale.

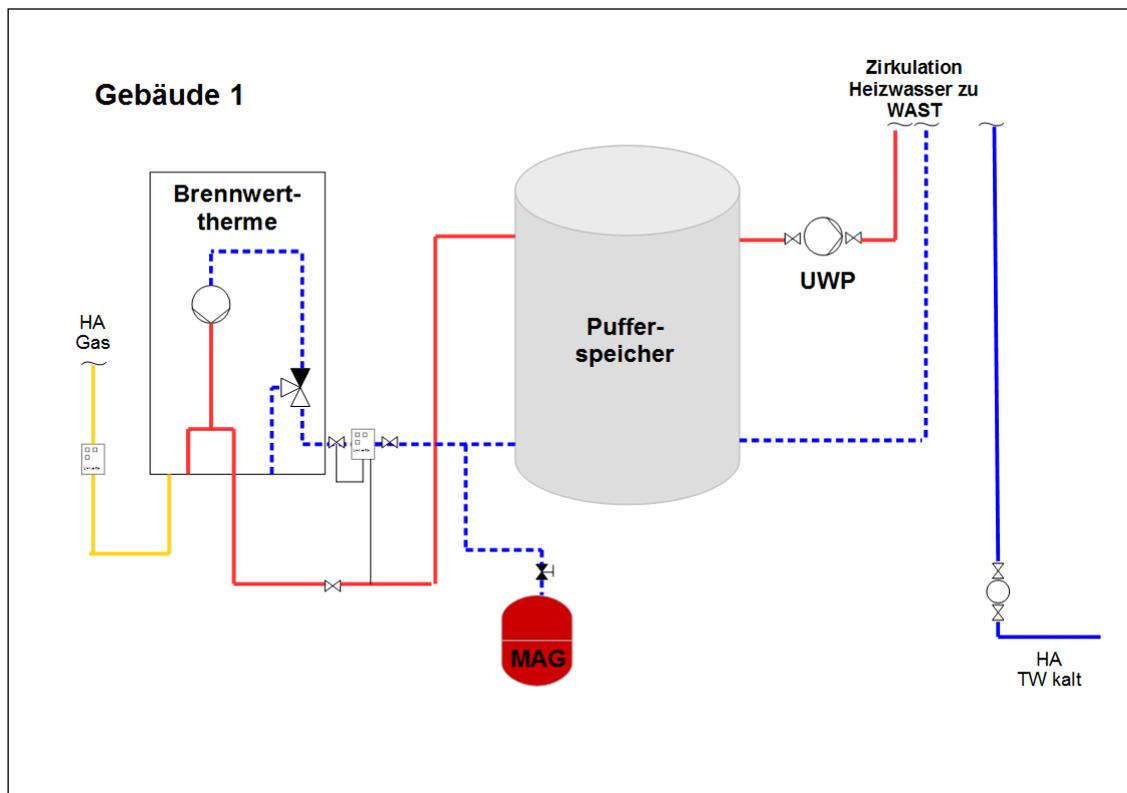


Abbildung 3 Gebäude 1, Prinzipschaltbild Heizzentrale



Abbildung 4 Brennwert-Kessel (links) mit Pufferspeicher (rechts)

Das Gebäude verfügt über einen Anschluss an das Gasnetz der Stadtwerke. Zur Erwärmung des Heizungswassers wird ein Gas-Brennwert-Kessel eingesetzt. Das erwärmte Wasser wird zunächst einem Pufferspeicher zugeführt (siehe Abbildung 4). Über den Pufferspeicher wird das Heizungswasser durch eine regelbare Pumpe über drei Steigleitungen zu den Wohnungsanschlussstationen (WAST) befördert.

In den WAST (siehe Abbildung 5) wird die Wärme indirekt über einen Plattenwärmeübertrager an den Sekundärkreis der Wohnung übertragen (Sekundärpumpe, Heizkreisverteiler, Deckenstrahlplatten, konventioneller Heizkörper im Bad). Raumweise Regler steuern die Stellantriebe auf dem Heizkreisverteiler.

Des Weiteren beinhaltet die WAST einen zweiten Wärmeübertrager für die Trinkwassererwärmung. Die Trinkwasserversorgung erfolgt über den Hausanschluss. Das Gebäude verfügt über drei Steigleitungen für das Trinkwasser.



Abbildung 5 Ansicht der Wohnungsanschlussstation

1.2.4 Sanierungskonzept Gebäude 2

Im Vergleich zum Gebäude 1 handelt es sich bei Gebäude 2 um ein investitionskostenreduziertes Konzept „A“. Die Sanierung umfasste:

- die Dämmung der Außenwände mit 70 mm starken Innendämmplatten auf mineralischer Basis (Xella-Multipor®),
 - die Installation von Plattenheizkörpern unter den Fenstern,
 - den Einbau einer zentralen Abluftanlage welche die Fortluft über Auslässe in den Küchen und Bädern absaugt (Luftzufuhr erfolgt über Fensterfalzlüfter),
 - die Realisierung einer zentralen Trinkwassererwärmung im Durchflussprinzip,
 - eine Brennwerttherme zur Direktversorgung der Raumheizung und eines 1000 l Pufferspeicher ausschließlich für die Reservehaltung zur Trinkwassererwärmung bei nur 33 kW Gesamtheizleistung
- sowie
- die Einrichtung einer Mitteltemperatur-Fahrweise 70/50 °C (Auslegung und Betrieb) für die Heizwärmeversorgung.

Die nachfolgende Abbildung skizziert den prinzipiellen Aufbau der Heizzentrale.

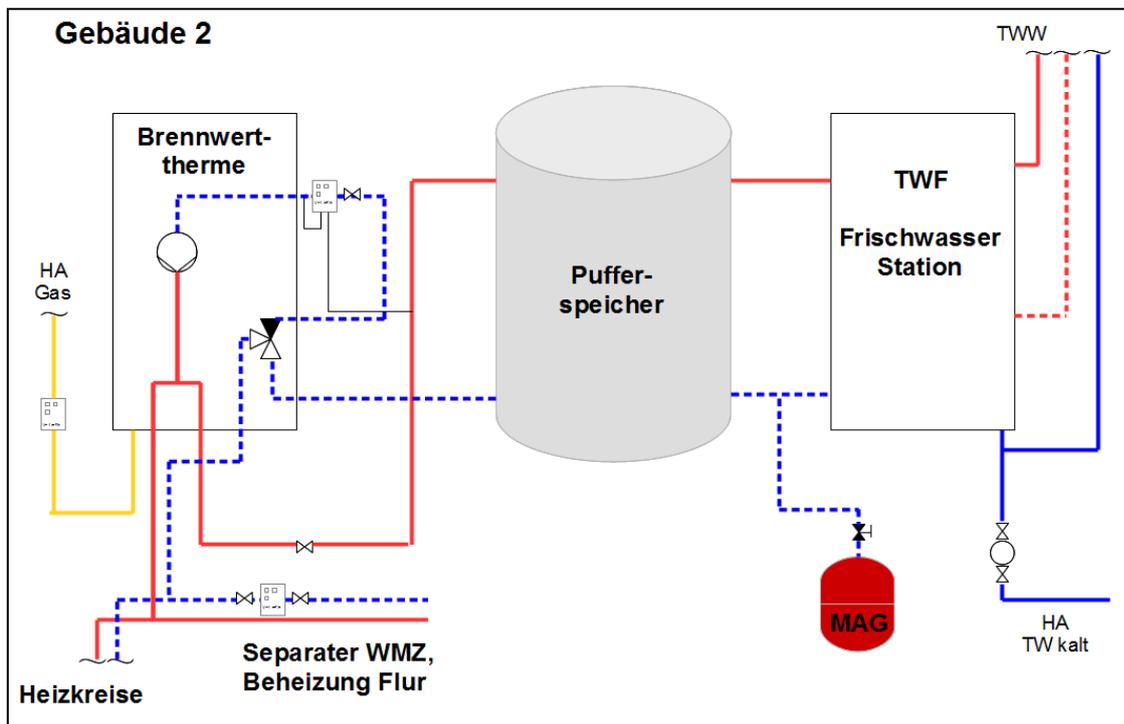


Abbildung 6 Gebäude 2, Prinzipschaltbild Heizzentrale

Das Gebäude verfügt über einen Anschluss an das Gasnetz der Stadtwerke. Zur Erwärmung des Heizungswassers wird ein Gas-Brennwert-Kessel eingesetzt. Die erzeugte Wärme ge-

langt zunächst in einen Pufferspeicher für Heizungswasser. Von dort aus verlaufen vier Steigleitungen durch das Gebäude. Die abgehenden Stichleitungen versorgen die in den Wohneinheiten befindlichen Platten- und Badheizkörper.

Ausgehend vom Pufferspeicher für das Heizungswasser wird außerdem eine Frischwasserstation (siehe Abbildung 7) mit Wärme versorgt, die das Trinkwasser im Durchflussprinzip erwärmt. Das Gebäude verfügt über vier Steigleitungen für das Trinkwarmwasser und zugehörige Zirkulationsleitungen.



Abbildung 7 Frischwassermodul in der Heizzentrale – rechts im Bild mit abgenommener Verkleidung

1.2.5 Sanierungskonzept Gebäude 3

Auch bei Gebäude 3 musste ein kostenreduziertes Konzept „B“ umgesetzt werden, welches sich jedoch von den Ansätzen in Gebäude 2 nochmals unterscheidet. In diesem Fall umfasste die Sanierung:

- die Dämmung der Außenwände mit 50 mm starken Innendämmplatten auf mineralischer Basis (Xella-Multipor®),
- die Installation von Plattenheizkörpern unter den Fenstern,
- den Einbau einer zentralen Abluftanlage welche die Fortluft über Auslässe in den Küchen und Bädern absaugt (die Zuluft wird über Fensterfalzlüfter (REGEL-air®) angesaugt),
- die Realisierung einer zentrale Trinkwassererwärmung im Speicherladeprinzip (SLS),
- eine Brennwerttherme zur Direktversorgung Heizung und SLS
sowie
- die Einrichtung einer Mitteltemperatur-Fahrweise 70/50 °C.

Die nachfolgende Abbildung skizziert den prinzipiellen Aufbau der Heizzentrale.

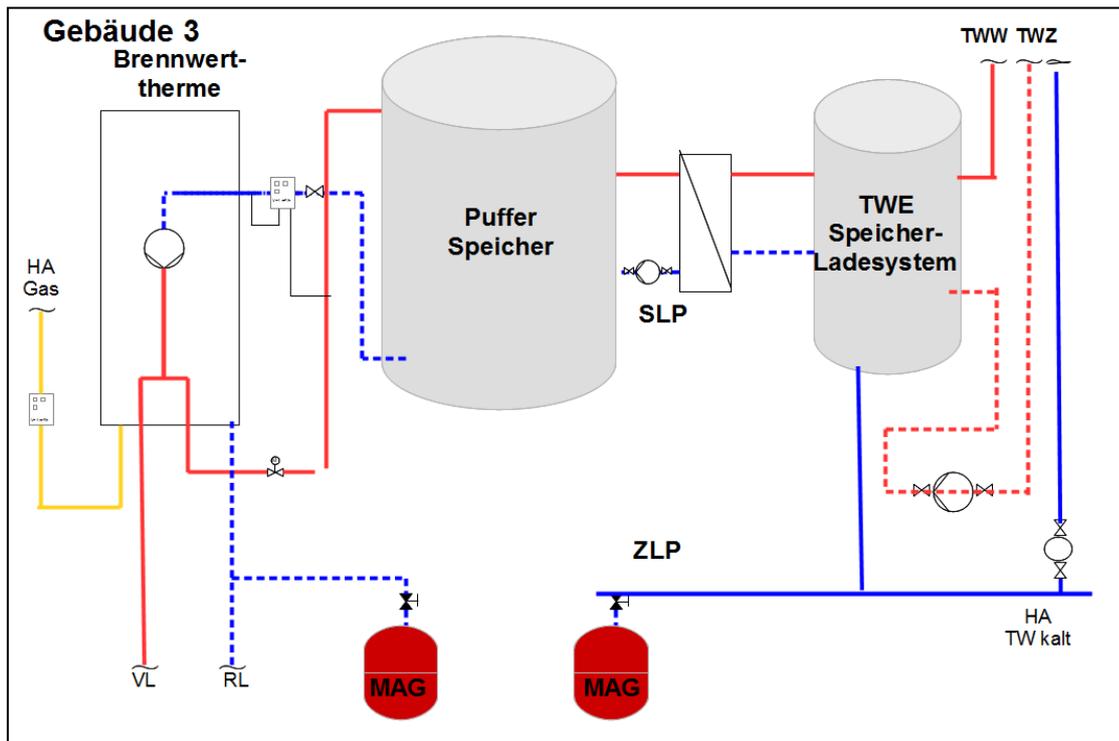


Abbildung 8 Gebäude 3, Prinzipschaltbild Heizzentrale

Das Gebäude verfügt über einen Anschluss an das Gasnetz der Stadtwerke. Zur Erwärmung des Heizungswassers wird eine Brennwerttherme eingesetzt. Ausgehend von dem Gas-Brennwert-Kessel wird über drei Steigleitungen das Gebäude heizungsseitig versorgt. Vom Gas-Brennwert-Kessel verläuft ein weiterer Strang zum Pufferspeicher für Heizungswasser.



Abbildung 9 Brennwertgerät mit Pufferspeicher (links) sowie Wärmeübertrager (rechts im Bild)

Hinter dem Pufferspeicher für das Heizungswasser befindet sich ein Plattenwärmeübertrager, über den das Trinkwasser im Speicherladeprinzip erwärmt wird. Das Gebäude verfügt über vier Steigleitungen für das Trinkwasser und Zirkulationsleitungen.

1.2.6 Gebäudepläne

Die Grundrisse der Gebäude können im vertraulichen Teil des Anhangs (Anlage V-01 bis Anlage V-03) eingesehen werden. Sie beinhalten

- die Wohnungs- und Raumgrenzen,
- die Raumnummern, an die unter anderem die Bezeichnung der dort verwendeten Sensoren geknüpft ist,
- die Lage der Wohnungsanschlusstationen,
- Informationen zum Status der Fensterkontaktkreise sowie
- die Lage und Bezeichnung der Bauteilmessstrecken.

Die Raumnummerierung beinhaltet die Etagen- und WE-Nummer und setzt sich nach dem Schema [Etage].[Nr. der Wohneinheit][Nr. des Raums] zusammen. Die Gebäude 1 und 3 verfügen jeweils über zwei Vollgeschosse und ein ausgebautes Dachgeschoss. Insgesamt befinden sich im Gebäude jeweils 9 Wohneinheiten. Gebäude 2 verfügt über drei Vollgeschosse und ein ausgebautes Dachgeschoss sowie über 10 Wohneinheiten.

Für den prinzipiellen Aufbau der Bauteilmessstrecken wurde eine entsprechende Darstellung im öffentlichen Bereich des Anhangs (Anlage P-01) eingefügt, in deren Darstellung beispielhaft die Sensorcodierungen enthalten sind. Dies ermöglicht die einwandfreie Zuordnung der gemessenen Werte zum jeweiligen Konstruktionsbereich.

1.3 Beschreibung des Messkonzepts

1.3.1 Verwendete Messgeräte und Sensoren

Für die **Aufzeichnung der Verbrauchsdaten** wurden in erster Linie M-Bus-fähige Erfassungsgeräte bzw. ergänzende M-Bus-Module eingesetzt. Im zentralen Bereich erfolgte die Erfassung der vom Wärmeerzeuger abgegebenen Heizwärme, des am Hausanschluss verbrauchten Erdgases sowie der für den Betrieb der Haustechnik (Versorgungsanlage, Fahrstuhl und Hauslicht) benötigten Elektroenergie. Wohnungsbezogen wurde die abgenommene Heizenergie, der Verbrauch von Kalt- und Warmwasser sowie der Elektroenergieverbrauch erfasst. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendete M-Bus-Messtechnik.

Tabelle 1 Gerätetechnik Verbrauchsmonitoring

Geräteart	Gerätetyp (Hersteller)	Installierte Anzahl
Wärmemengenzähler	ULTRAHEAT@T550 (Landis+Gyr GmbH)	28 (WE) + 3 (zentral)
Warmwasserzähler	ista domaqua@m (ista International GmbH)	35 (WE)
Kaltwasserzähler		35 (WE)
Gaszähler	BK-G4A (KNX/EIB Systemhaus)	3 (zentral)
Stromzähler	Q3DA1004 (EasyMeter GmbH)	28 (WE) + 3 (zentral)



Abbildung 10 Wärmemengenzähler in der Heizzentrale (links oben), Warm und Kaltwasserzähler in Einbausituation (rechts oben), Stromzähler mit aufgesetztem M-Bus-Modul (links unten), Gaszähler mit montiertem M-Bus-Modul (rechts unten)

Die direkte Anbindung der Warm- und Kaltwasserzähler mittels M-Bus-Modulen erfolgte nur in Fällen, in denen Wasserzähler an einer zusätzlichen Zapfstelle (abgesetzt vom Hauptin-

stallationsschacht) erfasst werden mussten. Wasserzähler, welche in unmittelbarer Nähe zu den Wärmemengenzählern eingeordnet sind, wurden jeweils über Impuls-Module direkt durch die Wärmemengenzähler miterfasst (Aufsatz von ista-contact-Modulen auf den Zählern).

Für die **Erfassung des Nutzerverhaltens** kamen Sensortypen verschiedener Hersteller zum Einsatz. Zur Erfassung des Raumklimas wurden kostengünstige DHT 22-Sensoren der Adafruit Industries verwendet. Für die Messung der Warm- und Kaltwassertemperatur wurden 1wire-Sensoren der Fa. Moritz Fuchs Elektronik eingesetzt. Die Fensterkontakte (Reed-Schalter) wurden bereits durch den Fensterbauer vorgerüstet und mussten lediglich verkabelt werden. Alle genannten Sensoren bekamen in der jeweiligen Wohneinheit (WE) eine Anbindung an einen Einplatinen-Rechner des Typs Raspberry Pi Modell B+, welcher mit den notwendigen Schnittstellen und Applikationen versehen wurde und gleichzeitig als Datenlogger fungiert (vgl. Abschnitt 1.3.2).

Tabelle 2 Gerätetechnik Monitoring Nutzerverhalten

Geräteart	Gerätetyp (Hersteller/Lieferant)	Installierte Anzahl
Raumklimafühler	DHT 22 / Adafruit Industries	134
Fensterkontaktkreise (raumweise Erfassung)	Reed-Kontakt / k.A.	104
Warmwassertemperaturfühler	MFE-TEMP-P3-50 / Moritz Fuchs Elektronik	35
Kaltwassertemperaturfühler		35



Abbildung 11 DHT22-Sensor (links), 1wire-Sensor mit Anschlusskabel (Mitte) und Reed-Kontakt (Beispiel rechts)

Zur Realisierung des **Bauteilmonitoring** wurde auf Komponenten des Systemhauses AHLBORN zurückgegriffen. Sowohl beim IET als auch beim IBK wird AHLBORN-Messtechnik seit langer Zeit sowohl im Laborbetrieb als auch bei Messprojekten im Feld eingesetzt. Sie erweist sich regelmäßig als robust und zuverlässig, ist jedoch vergleichsweise kostenintensiv. Insbesondere für Messungen der klimatischen Bedingungen innerhalb der Konstruktion (z.B. zwischen dem Innendämmsystem und der Bestandskonstruktion) ist derzeit keine alternative Lösung erprobt.

Die Anbindung der Sensoren erfolgt an systemeigene Datenlogger. Die Daten werden dort jedoch nicht wie üblich abgelegt, sondern durch einen zusätzlichen Controller (Bauteilmonito-

ring-Controller - BTMC) in der Gebäudezentrale abgefragt und aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 1.3.3).

Tabelle 3 Gerätetechnik Bauteilmonitoring

Geräteart	Gerätetyp (Hersteller/Lieferant)	Installierte Anzahl
Kombifühler (T, rH) in der Konstruktion	FHA 646 R / Ahlborn GmbH	40
Oberflächen-temperaturfühler	NTC-Fühler FN 0001 K / Ahlborn GmbH	36
Wärmestrom-messplatten	FQA190 / Ahlborn GmbH	7
Außenklimafühler (T, rH, p)	HAD 46-C4AG / Ahlborn GmbH	2



Abbildung 12 BTM-Datenlogger (links) sowie Netzwerkverteiler (RS422/485) (rechts)

1.3.2 Einordnung und Anbindung der Sensoren innerhalb der Wohneinheiten

Für die Anbindung der Sensoren innerhalb der Wohneinheiten (WE) wurden speziell angepasste Erfassungseinheiten (WE-Controller – WEC) entwickelt (siehe Abbildung 13). Sie beinhalten LSA-Plus-Klemmleisten zur einfachen und schnellen Anbindung der Sensorkabel sowie zur Vernetzung mit der Zentrale, einen Einplatinencomputer vom Typ Raspberry B+ (EPC) sowie eine Leiterplatte zur Aufnahme der Bauelemente für die Anbindung der Sensoren.

Der Anschluss der **Raumklimafühler** erfordert neben der Spannungsversorgung (3,3 V) und der Masseleitung einen freien Eingang (GPIO) am EPC für den Anschluss der Signalleitung. Diese ist zusätzlich mit einem Pull-Up-Widerstand zu versehen. Abbildung 14 enthält eine Prinzipskizze zum Anschluss der DHT-Sensoren. Die Installation der Sensoren in den Räumen erfolgte in eigens dafür vorgerüstete Schalterdosen neben den Lichtschaltern, welche mit einer luftdurchlässigen Abdeckung (normalerweise als Abdeckung für den Einbau von Lautsprechern vorgesehen) verschlossen wurden.

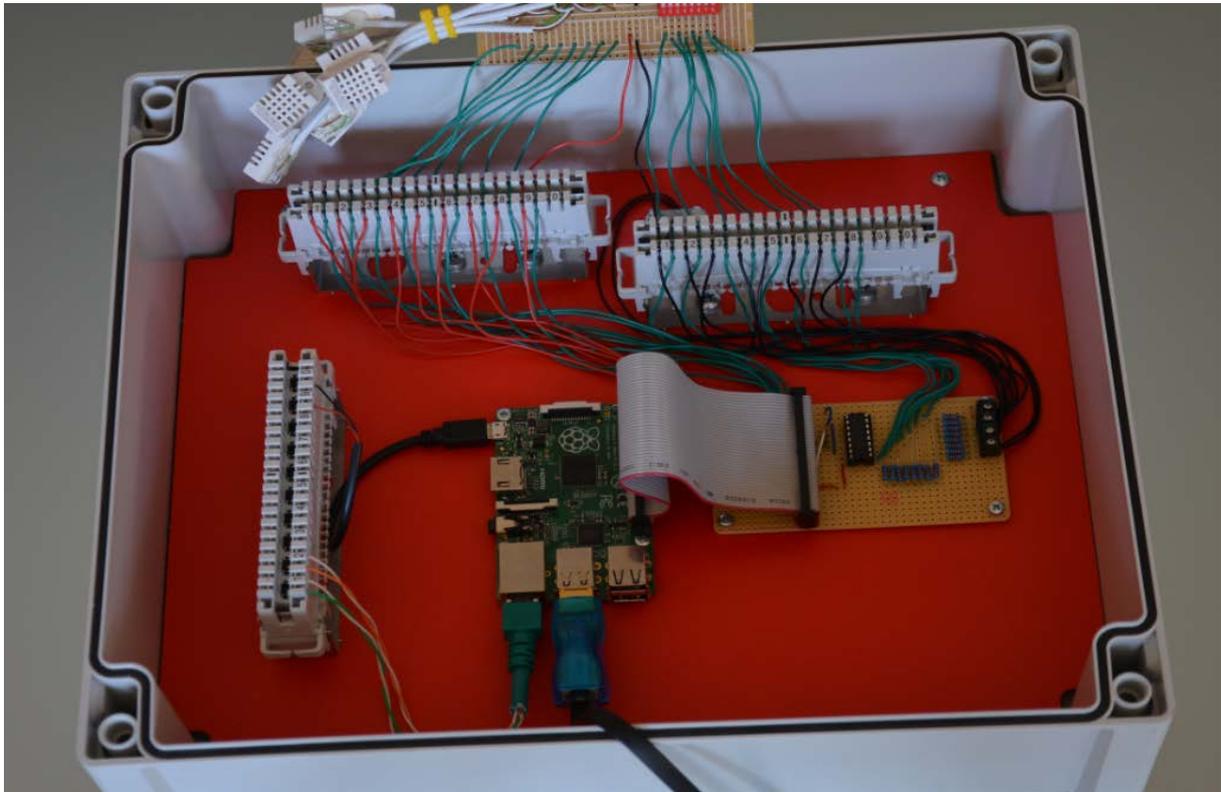


Abbildung 13 Ansicht des WEC mit angeschlossenen Testsensoren zur Prüfung der Funktionstüchtigkeit

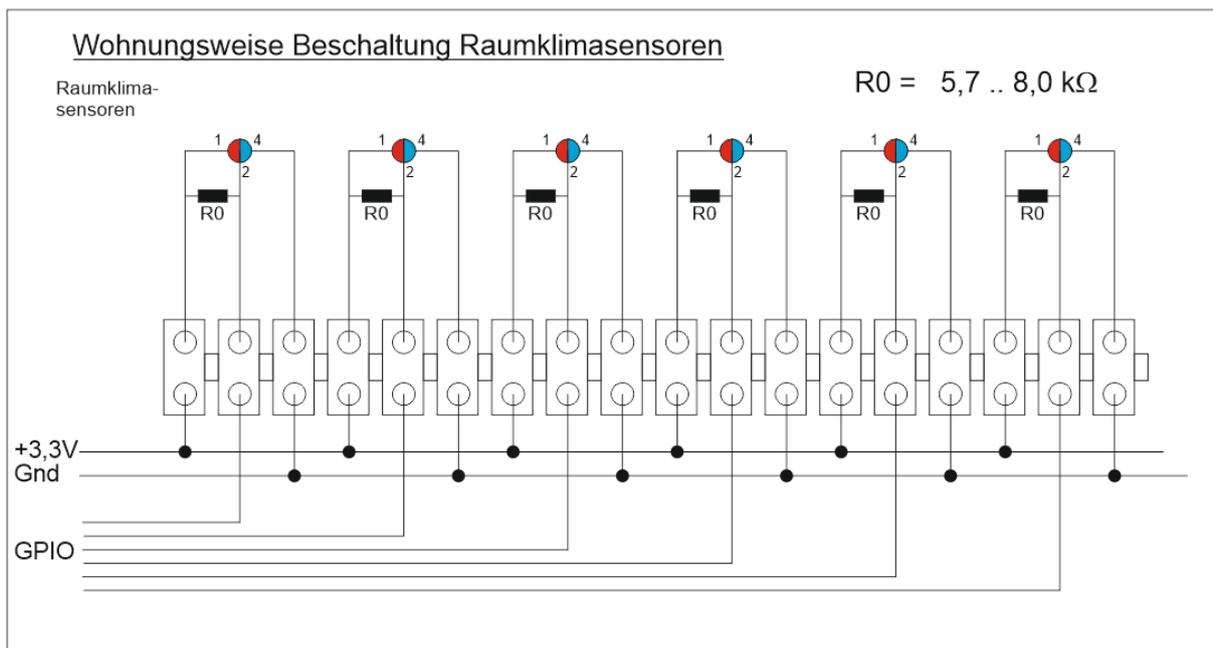


Abbildung 14 Prinzipskizze zur Anbindung der Raumklimasensoren an den WEC

Die Kontakte zur Überwachung des **Fensteröffnungsstatus** wurden jeweils raumweise in Reihe geschaltet (sofern in einem Raum gelüftet wird, ist es für die Untersuchung unerheblich, welches Fenster dazu geöffnet wurde). Der Anschluss der Fensterkontakte (FK) an den EPC erfolgte gemäß der nachstehenden Skizze (Abbildung 15) unter Verwendung eines A/D-Wandlers vom Typ MCP3008.

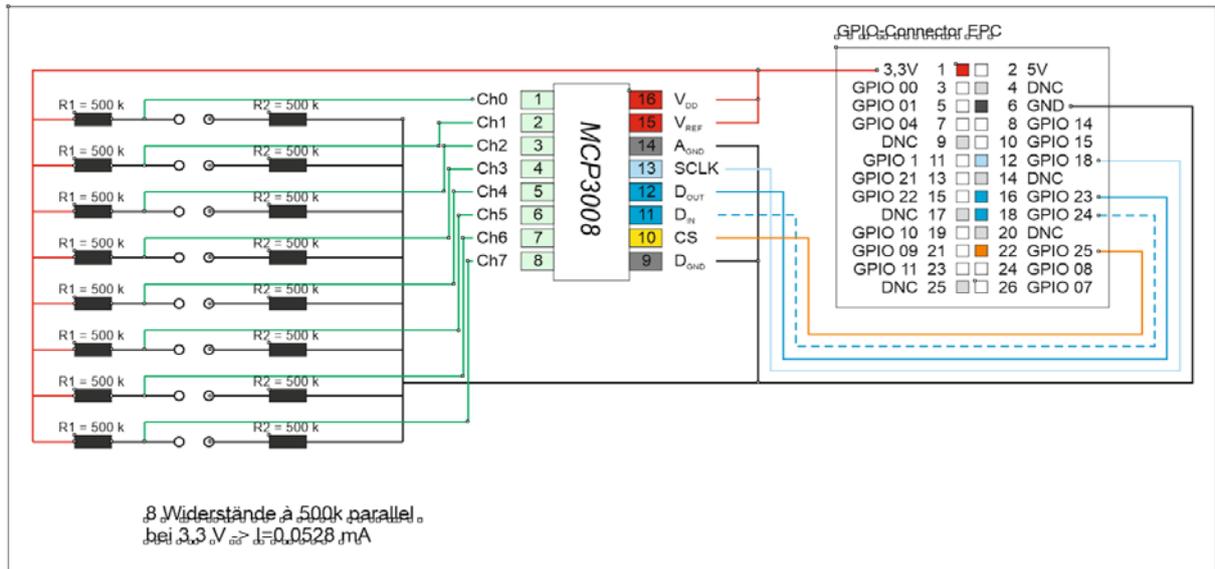


Abbildung 15 Anschluss der Fensterkontakte via MCP3008 an den EPC

Da die Fensterkontakte in der Regel geschlossen sind (bedingt durch die raumweise Reihenschaltung), wurden entsprechend hohe Widerstände verwendet, um den Ruhestrom auf ein Minimum zu begrenzen. Insgesamt stehen pro D/A-Wandler 8 Kanäle zur Verfügung, so dass 8 verschiedene Räume überwacht werden können. Für den Wohngebäudebereich ist demnach ein Wandler pro WE ausreichend.

Ebenfalls mittels des EPC erfolgt das Monitoring der **Oberflächentemperaturen an den Kalt- und Warm-Wasserleitungen** in den WE. Die dort befindlichen 1wire-Sensoren wurden, da nur zwei physikalische Leitungen verfügbar waren, parasitär mit Strom versorgt – d.h. die Adern 1-Wire Ground und V_{dd} wurden kurzgeschlossen. Ein Ausleseintervall von 30 Sekunden konnte dennoch problemlos realisiert werden. Der Anschluss der 1wire-Sensoren an den EPC erfolgt über einen entsprechenden USB-Adapter vom Typ DS9490R. Nach dem Mounten des Adapters am EPC können die Temperaturen aus dem 1wire-Filesystem (OWFS) ausgelesen und in entsprechende Dateien abgelegt werden.

Die **M-Bus-basierten Messgeräte** innerhalb der WE wurden im WEC lediglich zusammengeführt und über die Kabel zur Gebäudevernetzung mit dem M-Bus-Master in der Zentrale verbunden. Abbildung 16 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Anbindung der Geräte an das M-Bus-Netz.

Für das **Bauteilmonitoring** wurden in ausgewählten WE zusätzliche Messboxen installiert. Diese beinhalten jeweils einen Datenlogger sowie einen Netzverteiler-Knoten. Die Vernetzung aller im Gebäude vorhandenen Datenlogger für das Bauteilmonitoring erfolgt über die-

se Netzknoten mit dem BTMC in der Gebäudezentrale, welcher mittels Netztreiber auf das Netzwerk zugreift.

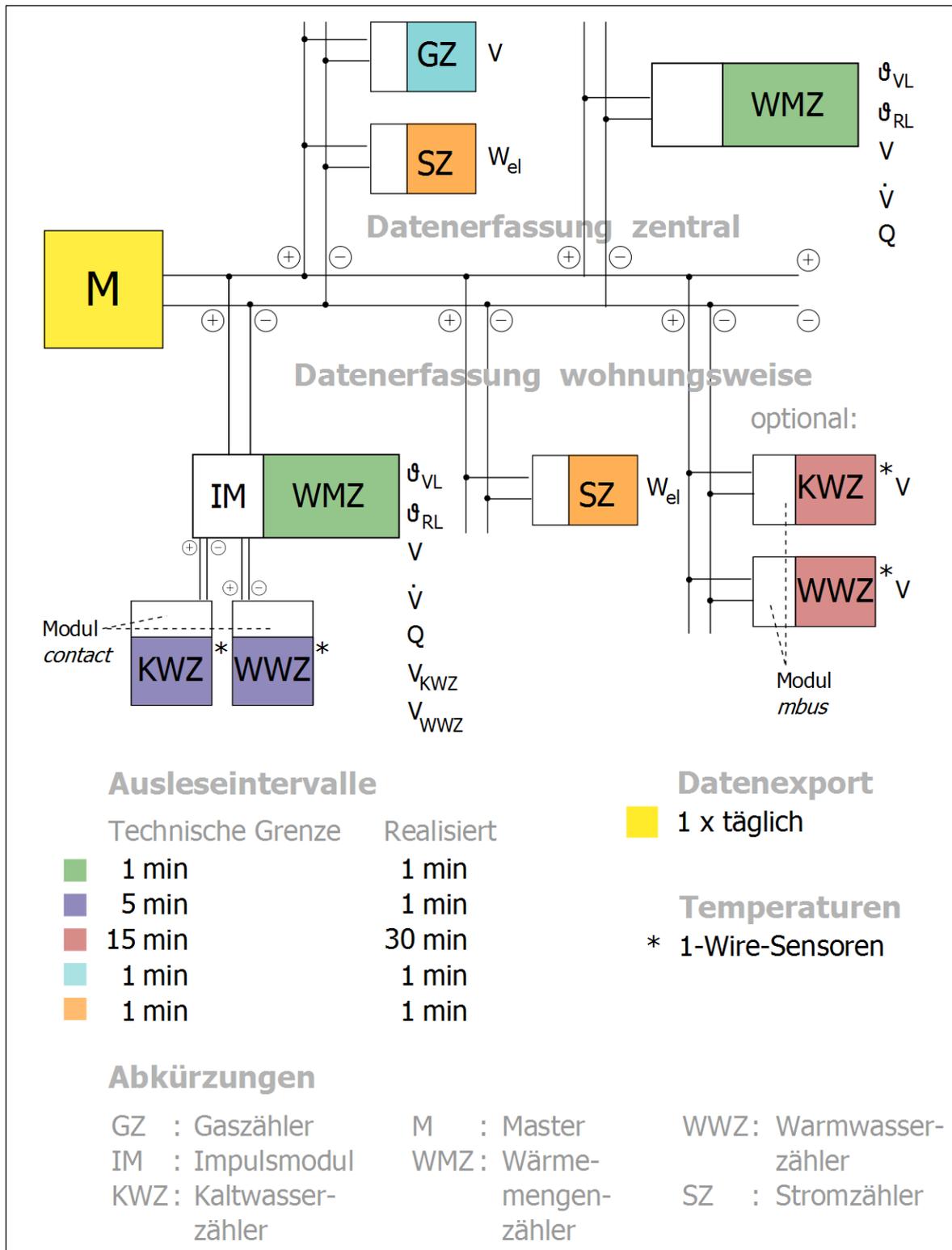


Abbildung 16 Schematischer Aufbau M-Bus-Netz

Die **Stromversorgung** sämtlicher in den WE betriebenen Monitoring-Komponenten erfolgte über die Kabel für die Gebäudevernetzung aus der jeweiligen Zentrale im Kellergeschoss. Dies hat drei wesentliche Vorteile:

- unbeabsichtigte Fremdeingriffe (Abschalten der Messtechnik) durch die Bewohner sind nicht möglich,
 - der Stromverbrauch für das Monitoring belastet nicht die Stromabrechnung der Mieter (Akzeptanzfrage)
- und
- die Geräte in den WE können von der Zentrale aus abgeschaltet / neugestartet werden, ohne dass damit eine Belästigung der Mieter einhergeht.

Die Einzige Ausnahme davon sind die Wärmemengenzähler, welche im Zuge der Installation (während der Sanierung der Gebäude) durch die Elektroinstallationsfirma fachgerecht an den vorgesehenen 230V-Anschluss angeschlossen wurde.

1.3.4 Aufbau der Gebäudezentrale und Vernetzungsprinzip

Zur Vernetzung sämtlicher Komponenten wurde in jedem der drei Gebäude eine Gebäudezentrale eingerichtet. Die darin befindliche Technik wurde durch Schaltschränke gegen Fremdzugriff gesichert. Sie beinhalten

- eine Hauptstromverteilung mittels Stockklemmen,
 - Netzteile zur Bereitstellung der verschiedenen notwendigen Versorgungsspannungen (5V für die Versorgung der WEC sowie 12V für die Versorgung der BTM-Infrastruktur),
 - eine Relais-basierte Abschaltelinrichtung, welche im Rahmen der Fernwartung den kontrollierten Neustart einzelner WEC ermöglicht,
 - einen M-Bus-Master (WEB-Log 250 der Fa. ReLay) zum Anschluss sämtlicher Buslasten (zentral, dezentral),
 - den BTMC inkl. AHLBORN-Netztreiber (der Controller übernimmt gleichzeitig die Funktion eines FTP-Servers für den Upload der Daten durch den M-Bus-Master,
 - einen Zentralrechner (ZR), welcher regelmäßig Remote-Verbindungen zur TUD herstellt und Zugriff auf sämtliche WEC, den BTMC und die Abschaltelinrichtung bietet,
 - einen Ethernet-Switch zur Vernetzung sämtlicher Komponenten
- sowie
- ein UMTS-Modem zur Datenübertragung an den Zentralserver an der TU Dresden und zur Fernwartung.

Die Stromversorgung wurde über einen eigenen festinstallierten und separat abgesicherten Anschluss am Hausstromverteiler realisiert. Abbildung 17 enthält ein Prinzipschaltbild der Zentrale sowie ein Foto eines der drei installierten zentralen Schaltschränke.

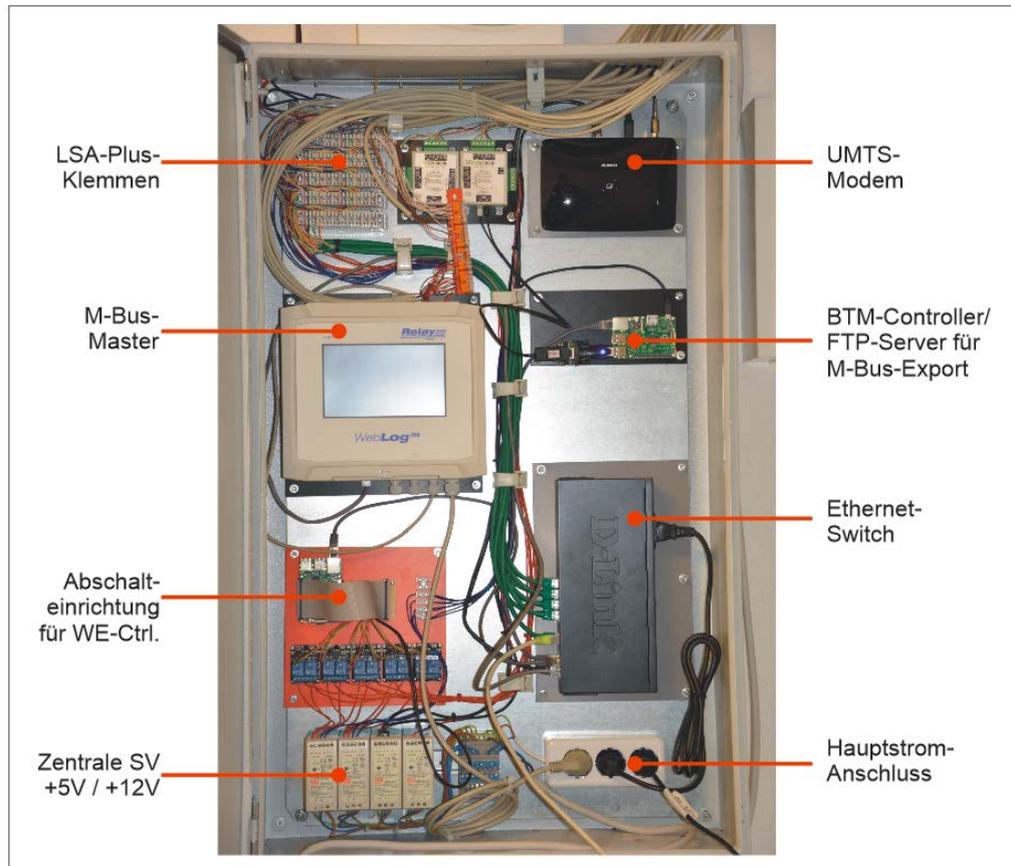
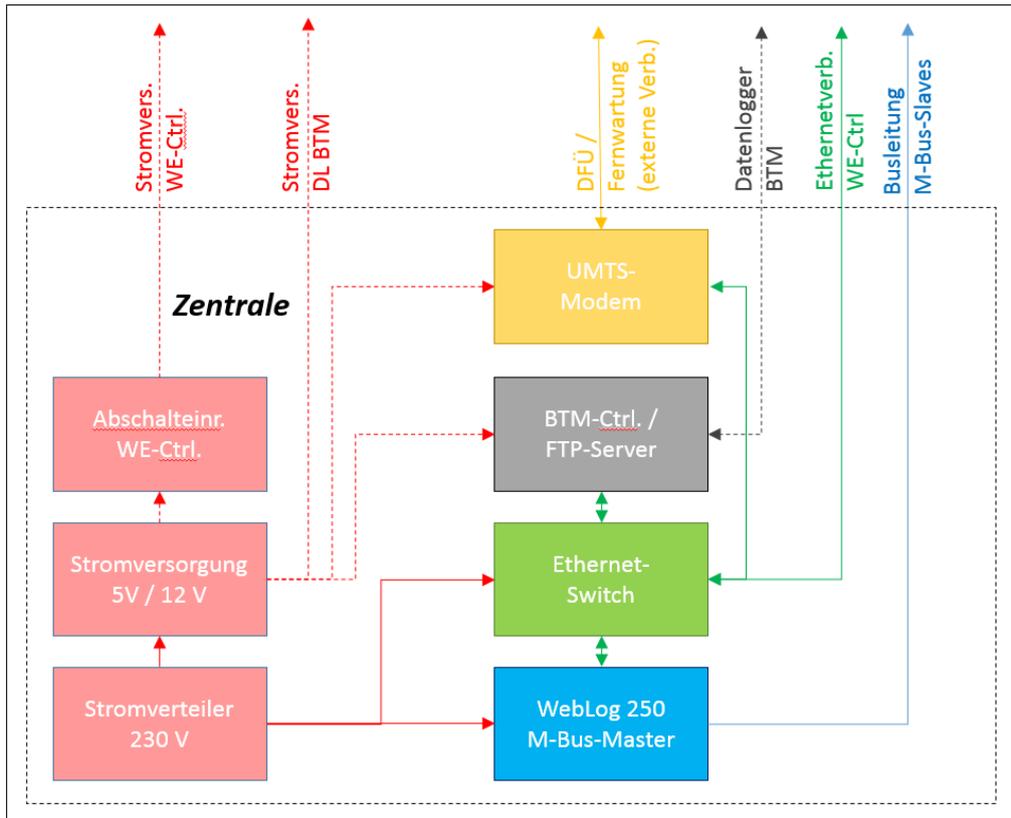


Abbildung 17 Prinzipschaltbild und Foto einer installierten Monitoring-Zentrale

Die notwendigen Verbindungen zwischen der Zentrale und den WE wurden mittels der vorgerüsteten Verkabelung (J-2Y(ST)Y – Kabel) hergestellt. Die Vorgabe für die Vorrüstung umfasste pro WE 3 Kabel der Dimension 6 x 2 x 0.8 und wurde mit wenigen Ausnahmen durch die Elektroinstallationsfirmen korrekt umgesetzt. Somit standen für jede WE 2 Kabel für die Vernetzung der WEC mit der Zentrale und ein optionales Kabel zu Vernetzung des Bauteilmonitoring zur Verfügung. Die Kommunikation der Zentrale mit den WEC erfolgte per Ethernet.

Die zentralen Einrichtungen wurden so gestaltet, dass ein Fremdzugriff auf die vorhandene Hardware, Software und Daten nicht bzw. nur mit sehr hohem Aufwand möglich ist. Es handelt sich um reine Linux-Systeme, alle Systemzugänge sind passwortgeschützt, automatische Updates werden nicht durchgeführt.

Zum Zweck der Fernwartung baut der Zentralrechner regelmäßig Remote-Verbindungen zur TU Dresden auf, über die dann die gesamte Anlage gewartet werden kann. Arbeiten vor Ort sind demnach nur erforderlich, sofern physikalische Eingriffe vorgenommen werden müssen. Mit der dafür vorgesehenen Abschaltvorrichtung konnte im Rahmen der Fernwartung auch ein Kaltstart der einzelnen WEC erfolgen.

1.3.5 Realisierung der Datenübertragung zum Datenserver des IBK

Die Übertragung der Rohdaten erfolgt einmal pro Tag automatisch durch die vor Ort befindlichen Clients (WEC / BTMC) an den Server im Bereich der TU Dresden. Dort erfolgt die Ablage in einer gesicherten Umgebung. Die Clients dürfen ihre Daten in den entsprechenden Verzeichnissen ablegen, haben jedoch keine Leserechte. Der Zugriff auf die Daten ist demnach nur für den Systemadministrator und ggf. weitere autorisierte Projektbeteiligte möglich – ein Zugriff von außen hingegen ist ausgeschlossen.

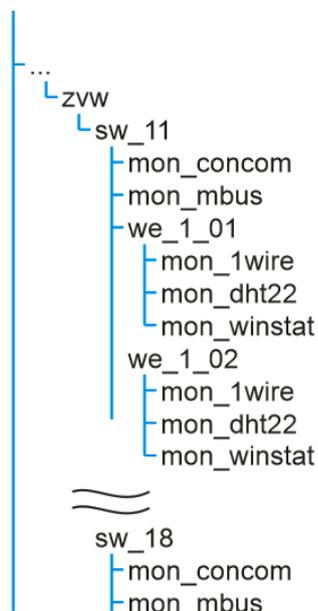


Abbildung 18 Ausschnitt aus der Struktur zur Ablage der Daten auf dem TU-Server der TUD

Abbildung 18 zeigt die hierarchisch aufgebaute Baumstruktur zur Ablage der Rohdaten auf dem Server. Da in den gewählten Verzeichnisnamen die wesentlichen Elemente des Messsystems abgebildet sind, kann eine Plausibilisierung und Vorverarbeitung der Rohdaten bereits auf dieser Grundlage erfolgen.

In Vorbereitung einer angestrebten automatischen Validierung der nachts eingegangenen Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität, wurden die zu Projektbeginn definierten Dateiformate noch einmal einer kritischen Prüfung unterzogen. Im Ergebnis erfolgten parallel zu den laufenden Messungen entsprechende Anpassungen, welche nicht zuletzt auch die Konvertierung bereits vorliegender Rohdaten erforderlich macht. Um diese Konvertierungsvorgänge reproduzierbar zu gestalten, wurde ein spezieller Workflow entwickelt, so dass die Konvertierung jederzeit neu vorgenommen werden kann. Die Beschreibung der Datenformate soll künftig als Vorgabe für alle im Bereich des IBK-Labors und anderer Messvorhaben Verwendung finden. Eine ausführliche Beschreibung der Formate (Aufbau von Dateibezeichnungen und Struktur der Header- und Datenzeilen) ist auf der Plattform <http://www.gucosa.de> unter dem Titel „Monitoring Tools File Specification“ öffentlich zugänglich abgelegt. Die automatische Eingangsprüfung und Plausibilisierung (grundsätzlicher Ablauf siehe Abbildung 19) ist weitgehend umgesetzt und wird für Folgeprojekte weiterentwickelt.

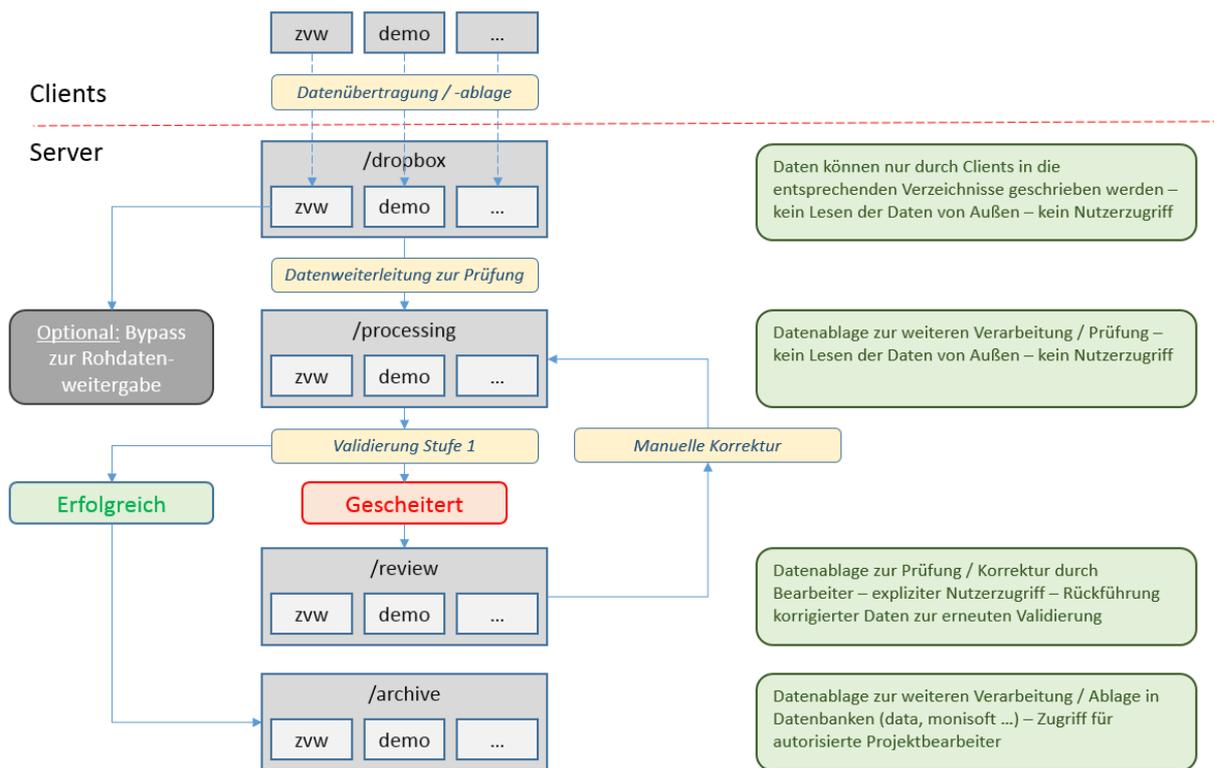


Abbildung 19 Flussdiagramm zur Datenplausibilisierung

Die vollständige Ablage aller Messdaten erfolgte in der Datenbank „**data**“ der Professur GEVV am IET. Der Zugriff auf die Datenbank (lesend und schreibend) erfolgt mittels des ebenfalls dort entwickelten „**data perl client**“. Die Lösung ist mandantenfähig. Der Zugriff erfordert passwortgeschützte Logins, so dass auch hier die Datensicherheit gewährleistet ist. Die Systematik zur Datenablage in **data** ist in Anlage V04.6 enthalten. Parallel dazu werden die Daten in der von der Begleitforschung empfohlenen Umgebung „MoniSoft“ eingelesen. Aufgrund der hohen Auflösung der Datensätze (Messintervalle von teils 30-Sekunden), erweist sich jedoch der Datenimport wie auch die Weiterverarbeitung der Daten mittels MoniSoft als vergleichsweise zeitaufwendig. Die Alternative zur Plausibilisierung und Vorverarbeitung auf Rohdatenbasis wurde daher parallel weiterverfolgt.

1.3.6 Prüfung und Kalibrierung der verwendeten Sensoren

Während es sich bei den Zählern für das Verbrauchsmonitoring um abrechnungsrelevante und somit geeichte Geräte handelt, mussten die übrigen eingesetzten Messfühler zunächst einer Überprüfung und sofern notwendig einer Kalibrierung unterzogen werden.

Die 1Wire-Sensoren basieren auf einem DS18B20-Sensor. Dieser Sensor realisiert gemäß Herstellerangaben eine hohe Messwertauflösung. Im Rahmen einer stichprobenartigen Überprüfung konnte dies nachgewiesen werden. Insgesamt wurden dabei zehn 1Wire-Sensoren mit einem Trockenkalibrator überprüft. Für die Referenzmessung wurde das Präzisionsthermometer des Trockenkalibrators verwendet. Es wurde eine Zwei-Punkt-Kalibrierung durchgeführt, dies entspricht der Überprüfung zweier stationärer Temperaturniveaus. Für den Nachweis der Linearität der sich ergebenden Kennlinie wären mindestens drei Temperaturniveaus nötig, dies war jedoch aufgrund des für die Kalibrierung zur Verfügung stehenden Zeitintervalls nicht realisierbar.

Der Sollwert der Temperatur des Trockenkalibrators wurde im ersten Schritt auf $\vartheta=30\text{ °C}$ eingestellt. Die Messwerte der 1-Wire-Sensoren und des Präzisionsthermometers wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Im zweiten Schritt wurde der Sollwert der Temperatur des Trockenkalibrators auf $\vartheta=60\text{ °C}$ eingestellt und das Vorgehen wiederholt. Die Überprüfung von geringeren Temperaturen war nicht möglich, da der verwendete Trockenkalibrator über keinen Kühler verfügt und die Umgebungstemperatur bei $\vartheta=27\text{ °C}$ lag.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt. Es wird jeweils der exakte Messwert des Präzisionsthermometers unter Angabe des Vertrauensbereiches der 1Wire-Sensoren in Balkenform dargestellt. Die 1-Wire-Sensoren werden mit Großbuchstaben von A bis J indiziert. Die Messwerte sind als Messpunkt zum dazugehörigen Messwert des Präzisionsthermometers eingetragen. Für beide Temperaturniveaus zeigt sich, dass die Messwerte der 1Wire-Sensoren innerhalb des Vertrauensbereiches von $\Delta T=\pm 0,5\text{ K}$ liegen. Die maximale Messwertabweichung beträgt $\Delta T=0,2975\text{ K}$ für den Sensor D. Aus diesem Ergebnis wurde geschlossen, dass die 1Wire-Sensoren nicht kalibriert werden müssen. Daher wurde auch keine Regression durchgeführt. In der Auswertung werden die Rohdaten der 1Wire-Sensoren verwendet.

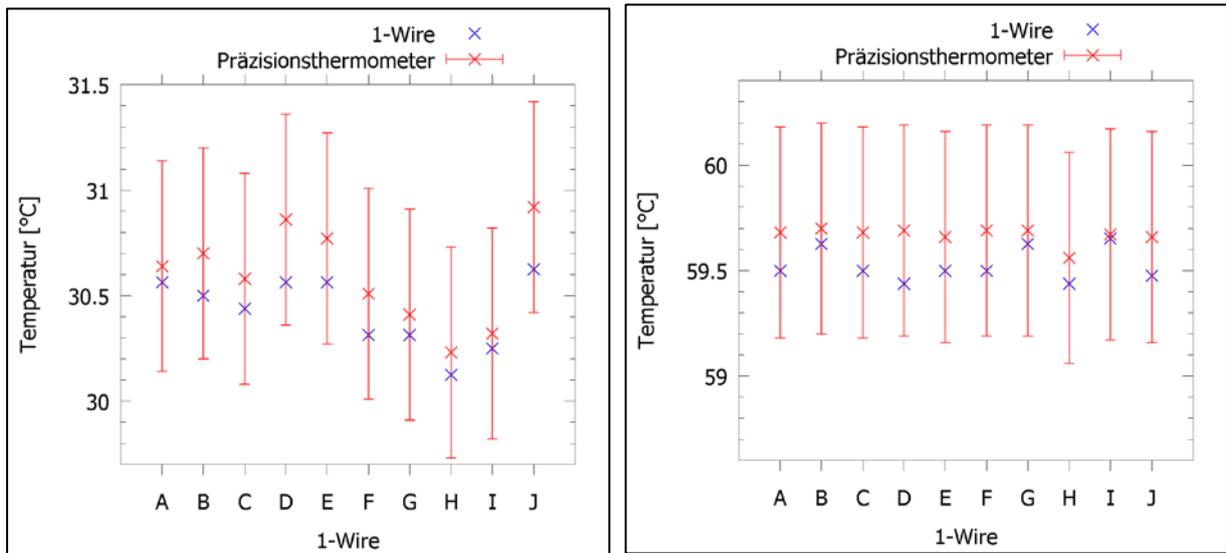


Abbildung 20 Ergebnis der Überprüfung ausgewählter 1Wire-Sensoren

Bezüglich der Auswertung der Daten der 1Wire-Sensoren ist zu berücksichtigen, dass die theoretische Zeitauflösung der Sensoren 20 Sekunden beträgt. Zum Schutz der empfindlichen Fühler, befinden diese sich jedoch in einem Hüllrohr. Die Wärme muss also zunächst durch das Hüllrohr transportiert werden, bevor der Sensor eine Temperaturänderung detektieren kann. Dies äußert sich in einer zeitlichen Trägheit des Ansprechverhaltens der 1Wire-Sensoren. Abbildung 21 verdeutlicht diesen Sachverhalt für einen 1-Wire-Sensor. Für die Erwärmung von $\vartheta=28\text{ °C}$ auf $\vartheta=60\text{ °C}$ liegt die zeitliche Trägheit bei $\Delta t \approx 3\text{ min}$. Für das Abkühlen des Sensorelements auf Umgebungszustand liegt diese bei $\Delta t \approx 15\text{ min}$.

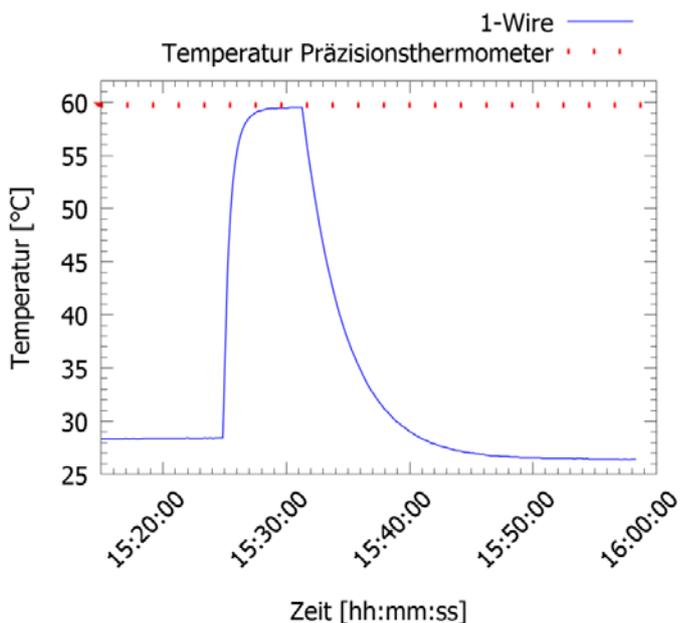


Abbildung 21 Zeitlicher Verlauf einer 1Wire-Kalibrierkurve

Die betrachtete Temperaturdifferenz ist mit ca. 30 K sehr groß. Für die Anwendung im Monitoring-Projekt stellt dies jedoch eine übliche Größe dar. Daraus kann insgesamt geschlossen werden, dass die 1-Wire-Sensoren aufgrund der hohen Messwertauflösung und der hohen möglichen Zeitauflösung gut für die Anwendung im Monitoring-Projekt geeignet sind. Es muss jedoch bei der Auswertung beachtet werden, dass aufgrund der Trägheit ein zeitlicher Offset zwischen dem tatsächlichen physikalischen Ereignis und der sichtbaren Temperaturänderung des Sensors liegt. Diesem Effekt unterliegen jedoch auch andere Temperatursensoren, wie z. B. PT-100-Fühler, welche daher keinen Vorteil bieten.

Zur Qualitätsbewertung der Raumklimafühler wurden diese ebenfalls einem Eignungstest unterzogen. Dieser zeigte eine gute Eignung der Sensorelemente im vorgesehenen Einsatzbereich. Das Ergebnis eines Vergleichs von 8 Sensoren zeigt eine gute Übereinstimmung.

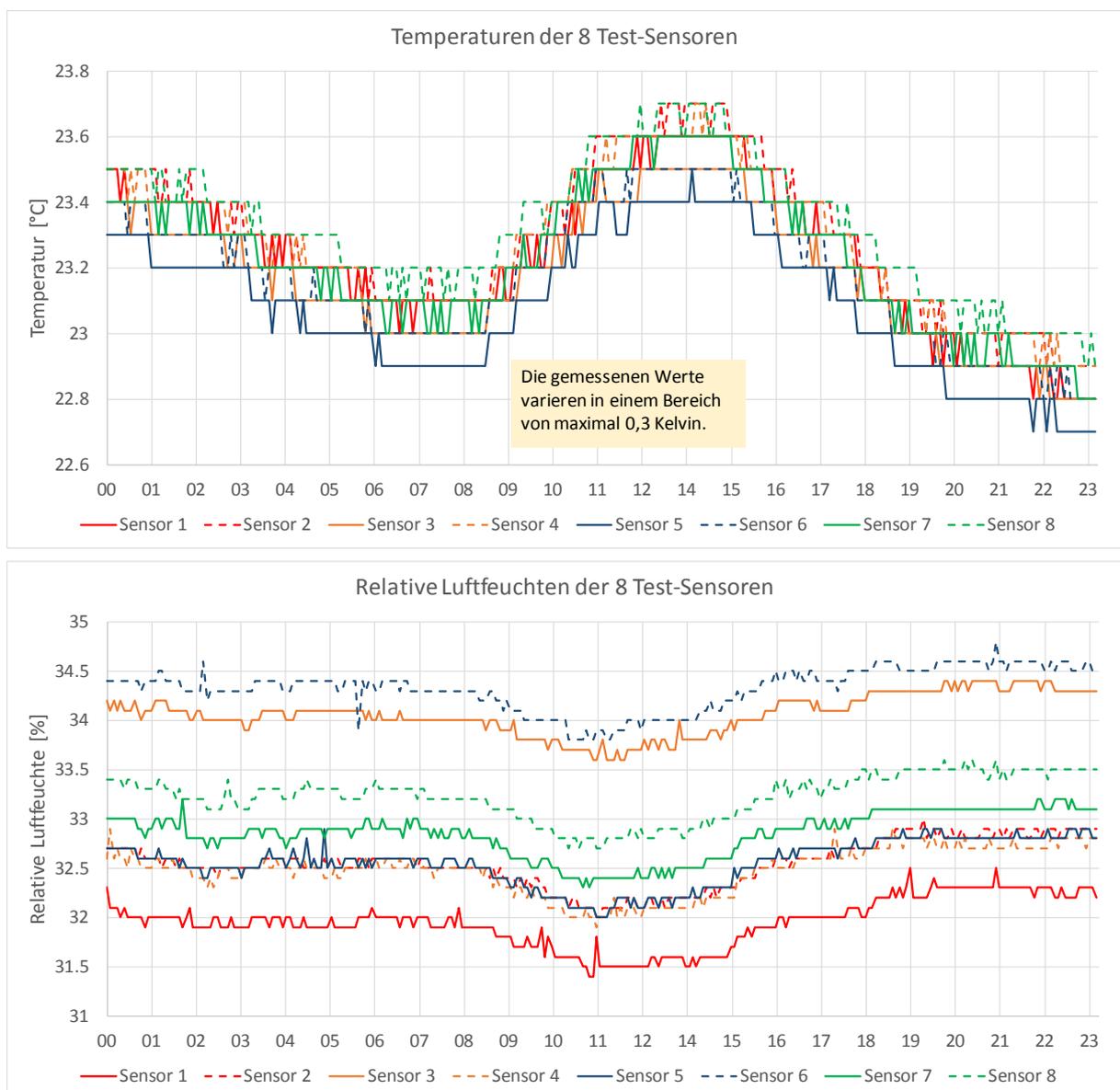


Abbildung 22 Vergleich der Messwerte ausgewählter Raumklimafühler

Die für das Bauteilmonitoring verwendeten Messfühler aus dem AHLBORN-Produktportfolio wurden im IBK-Labor einem Test unterzogen und mittels der vorhandenen Kalibriertechnik eingestellt.

1.4 Dokumentation erfasster Messdaten

1.4.1 Datenmengen, Datenqualität

Während des Projektes wurden ca. 22 GB an Rohdaten erfasst plausibilisiert und strukturiert abgelegt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Verteilung der erfassten Gesamtdatenmenge auf die verschiedenen Monitoring-Zwecke.

Tabelle 4 Verteilung der erfassten Datenmengen

Monitoring-zweck	Bezug	Datenmenge [MB]		Anteil [%]	
		Rohdaten	Konvertierung	Rohdaten	Konvertierung
Verbrauchs- erfassung	Haus 1	4.754,78	649,30	20,83	6,67
	Haus 2	4.975,87	642,51	21,80	6,60
	Haus 3	4.453,43	534,36	19,51	5,49
	Summe	14.184,08	1.826,17	62,14	18,75
Wasser- temperaturen	Haus 1	1.433,35	1.241,47	6,28	12,75
	Haus 2	1.777,35	1.460,98	7,79	15,00
	Haus 3	1.731,40	1.408,56	7,59	14,47
	Summe	4.942,09	4.111,02	21,65	42,22
Raum- klima	Haus 1	1.138,01	1.164,64	4,99	11,96
	Haus 2	1.156,40	1.184,52	5,07	12,16
	Haus 3	1.081,55	1.113,96	4,74	11,44
	Summe	3.375,96	3.463,12	14,79	35,57
Fenster- status	Haus 1	5,73	6,29	0,03	0,06
	Haus 2	5,68	6,62	0,02	0,07
	Haus 3	4,0	3,96	0,02	0,04
	Summe	15,41	16,87	0,07	0,17
Bauteil	Haus 1	108,68	111,76	0,48	1,15
	Haus 2	54,24	60,47	0,24	0,62
	Haus 3	144,89	147,86	0,63	1,52
	Summe	307,81	320,09	1,35	3,29

Den größten Anteil an der erfassten Rohdatenmenge nimmt das Verbrauchsmonitoring ein. Die liegt in erster Linie am speicherintensiven Exportformat des Datenloggers. Nach erfolgter Konvertierung der Daten nehmen die erfassten Datenmengen in den Bereichen Wassertemperatur und Raumklima die größten Anteile ein, da hier vergleichsweise viele Sensoren er-

fasst werden und die Erfassungsintervalle mit 30 Sekunden (Wassertemperaturen) bzw. einer Minute (Raumklimafühler) sehr kurz sind.

Einen Überblick über alle erfassten Daten / Sensoren, deren Bezeichnung und die Erfassungsintervalle sind im vertraulichen Teil des Anhangs (Anlage V-04) enthalten. Prinzipiell wurden kurze Erfassungsintervalle (≤ 1 Minute) angestrebt. Lediglich im Bereich des Bauteilmonitoring erfolgte die Aufzeichnung im 5-Minuten-Takt, da sich die Zustände innerhalb der Konstruktion auf Grund der Trägheit ohnehin nur sehr langsam ändern. In der nachfolgenden Tabelle werden die Erfassungszeiträume im Sinne der zeitlichen Datenverfügbarkeit als Übersicht dargestellt.

Tabelle 5 Datenverfügbarkeit / Erfassungszeiträume

Datenart	Erfassungszeitraum	Bemerkung
Wärmemengenzähler WE	01.12.2015 – 31.12.2017 (Haus 1) 14.01.2016 – 31.12.2017 (Haus 2) 08.03.2016 – 31.12.2017 (Haus 3)	- Die Inbetriebnahme der M-Bus-Technik bedurfte zunächst der Klärung technischer Randbedingungen mit dem Hersteller des M-Bus-Masters. Dies gestaltete sich zeitaufwendig, so dass die schrittweise M-Bus-Einbindung erst Anfang 2016 erfolgen konnte.
Wärmemengenzähler zentral	22.06.2016 – 31.12.2017 (Haus 1) 24.08.2016 – 31.12.2017 (Haus 2) 12.07.2016 – 31.12.2017 (Haus 3)	- Der Wärmemengenzähler zwischen Erzeuger und Pufferspeicher zur TWE wurde fehlerhaft installiert. Daher erfolgte eine Nachuntersuchung zum Anlagenverhalten mittels mobiler Messtechnik.
Kalt-/Warmwasserzähler WE	01.12.2015 – 31.12.2017 (Haus 1) 14.01.2016 – 31.12.2017 (Haus 2) 08.03.2016 – 31.12.2017 (Haus 3)	- Die Inbetriebnahme der M-Bus-Technik bedurfte zunächst der Klärung technischer Randbedingungen mit dem Hersteller des M-Bus-Masters. Dies gestaltete sich zeitaufwendig, so dass die schrittweise M-Bus-Einbindung erst Anfang 2016 erfolgen konnte.
Stromzähler WE/zentral	23.02.2016 – 31.12.2017 (Haus 1) 30.06.2016 – 31.12.2017 (Haus 2) 08.03.2016 – 31.12.2017 (Haus 3)	- M-Bus-Modul des Stromzählers Hausstrom H1 konnte erst ab dem 14.07.2016 eingebunden werden - Die M-Bus-Module in Haus 2 waren nicht vorinstalliert – sie mussten zunächst nachgerüstet werden.
Gaszähler	14.07.2016 – 31.12.2017 (Haus 1) 30.06.2017 – 31.12.2017 (Haus 2) 12.07.2016 – 31.12.2017 (Haus 3)	- Die Einbindung der Gaszähler war erst nach erfolgter Nachrüstung der benötigten M-Bus-Module möglich.
Kalt-/Warmwasser-Temperaturfühler WE	01.10.2015 – 31.12.2017	- Die Daten sind nahezu vollständig verfügbar (>99 %). Vereinzelt fehlende Temperaturwerte können daher ignoriert (als Zeit ohne Entnahme betrachtet) werden.
Raumklimafühler	01.10.2015 – 31.12.2017	- Die Daten sind nahezu vollständig verfügbar (>99 %). Die Vervollständigung fehlender / nicht plausibler Daten erfolgt durch Interpolation bzw. Ersatz aus validen Quellen (benachbarter Raum etc.)
Fensteröffnungskontakte	01.10.2015 – 31.12.2017	
BTM-Daten	01.10.2015 – 31.12.2017	

Insgesamt kann von einer sehr guten Datenverfügbarkeit ausgegangen werden. Die Messungen wurden über das Ende der Projektlaufzeit hinaus bis zum 31. Mai 2018 fortgeführt, so dass für weiterführende Betrachtungen Daten über zwei vollständige Heizperioden auswertbar sind. Für die folgenden Darstellungen werden die Daten über einen Jahreszyklus (01.01.2017 – 31.12.2017) herangezogen.

1.4.2 Workflow zur Aufbereitung und Auswertung der Daten

Der Ablauf zur Aufbereitung der Daten umfasst vier Ebenen. In der **Ebene 1 – Datenübernahme** wurden täglich die Rohdaten automatisch durch die Clients (WEC und BTMC) an den Server des IBK übertragen. Dort erfolgte die strukturierte Ablage der Daten und deren Prüfung auf Vollständigkeit (Vorhandensein der erwarteten Files und deren Größe). Da die Formate der mittels institutseigener Software erzeugten Dateien (Raumklimadaten, Wassertemperaturen, Fensteröffnungskontakte und Bauteilmonitoring-Daten) nach Projektstart nochmals optimiert wurden, musste in dieser Ebene auch eine Konvertierung älterer Dateien in das aktuelle Format vorgenommen werden. Die M-Bus-Daten, welche durch den M-Bus-Master in einem proprietären Format (zeilenweise Ausgabe aller Messwerte) übergeben wurden, wurden anhand von Parameterfiles geparkt und in Tabellenform ausgegeben. Nach Übernahme und Konvertierung liegt ein konsistentes Rohdatenmassiv für die weiteren Schritte vor. Alle Daten wurden in Tabellenform abgelegt. Als Dezimaltrennzeichen wird einheitlich ein Punkt verwendet – Spaltentrennzeichen sind Tabulatoren. Die Dateien können so unmittelbar in Excel eingelesen und weiterverarbeitet werden. Ebenso können die Daten aus diesen Dateien mittels Verknüpfung in reguläre Excel-Dateien übernommen und dort sofort weiterverarbeitet werden.

Diese Weiterverarbeitung erfolgt in **Ebene 2 – Datenplausibilisierung**. Hier werden die Daten aus Ebene 1 übernommen, Anhand der Visualisierung in **Ebene 3 – Plausibilisierung** überprüft und ggf. korrigiert / vervollständigt. Die nachfolgenden Abbildungen skizzieren die Schnittstelle zwischen Ebene 1, Ebene 2 und den nachfolgend beschriebenen Ebenen.

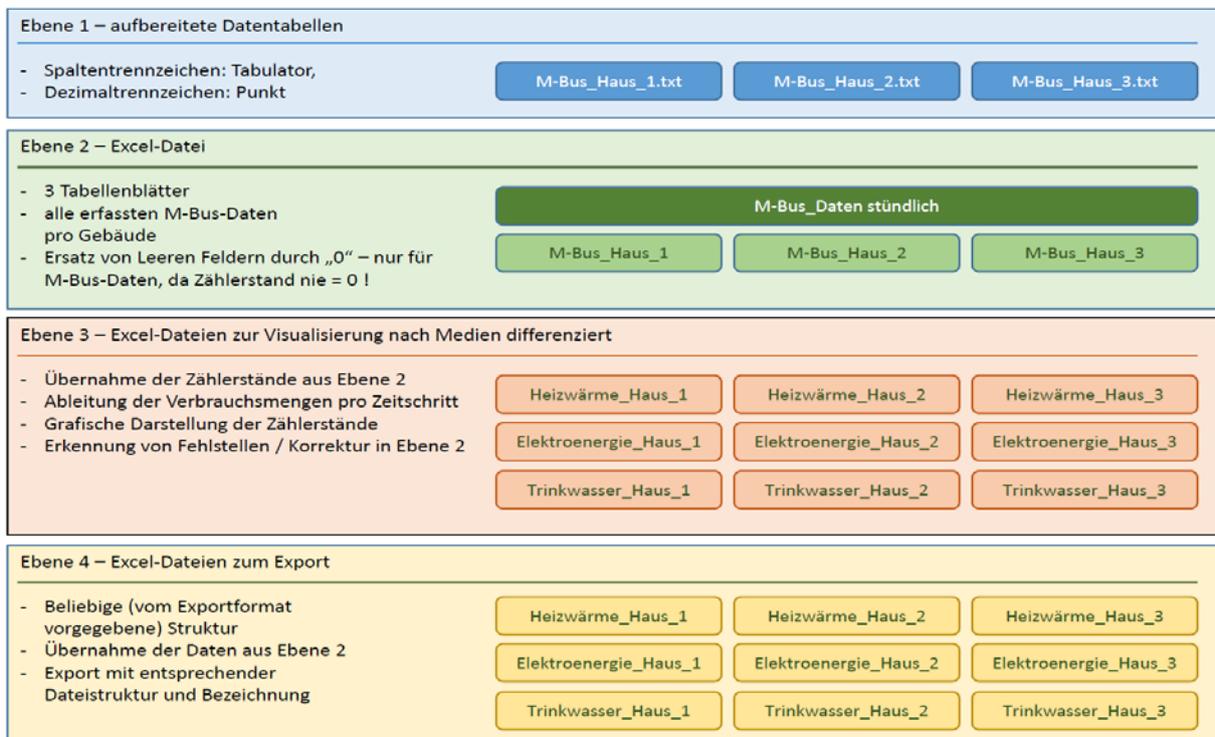


Abbildung 23 Ebenen-Modell Workflow zur Datenverarbeitung M-Bus-Daten

In der **Ebene 4 – Datenweitergabe** erfolgt die Umstrukturierung der plausibilisierten Daten entsprechend den Vorgaben der Zielformate und die Ausgabe der Exportfiles. Diese können anschließend als Eingangsgrößen für Bauteil-, Gebäude- und Anlagensimulationen verwendet und für weitere, vertiefende Untersuchungen herangezogen werden.

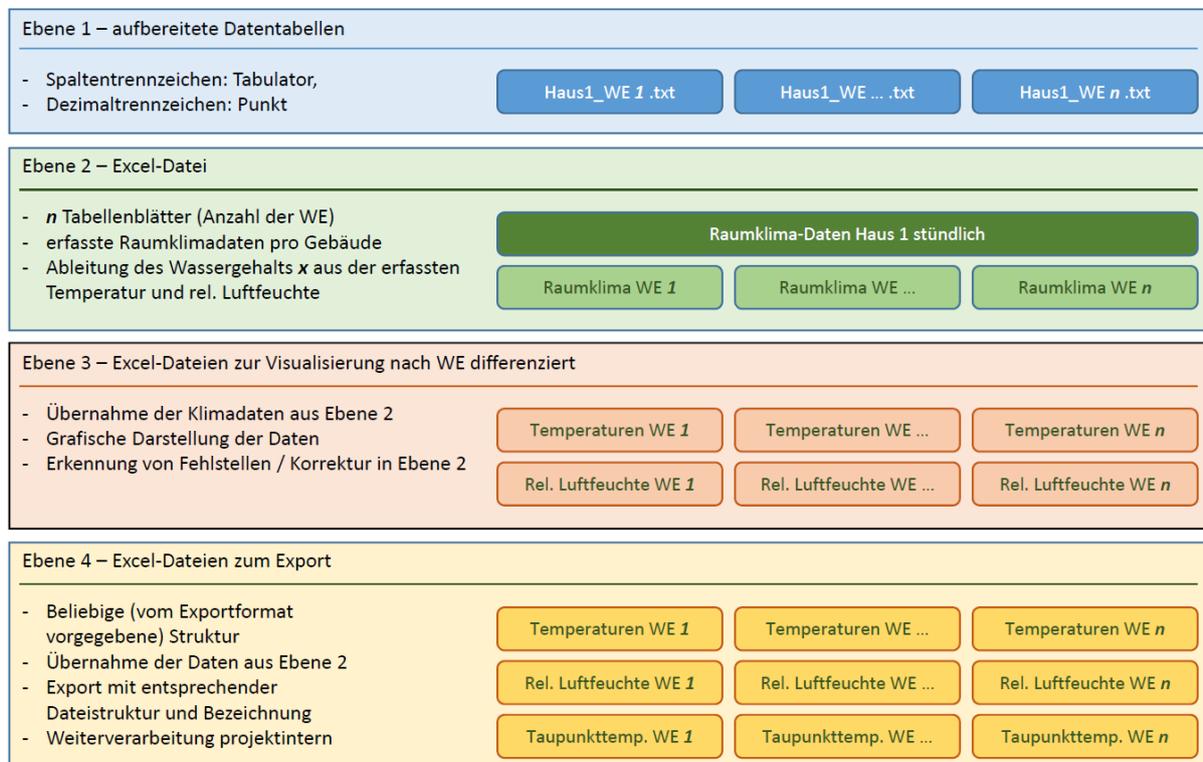


Abbildung 24 Ebenen-Modell Workflow zur Datenverarbeitung Raumklima-Daten

1.4.3 Allgemeine Darstellung der erfassten Daten

1.4.3.1 Verbrauchsmonitoring - Zählerdaten

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten die grafische Darstellung der Wärmemengenzählerstände für die drei betrachteten Gebäude über den Zeitraum von Beginn der Erfassungen bis zum ersten Quartal 2018. Die Darstellungen wurden auf der Basis von Stundenwerten erstellt. Die zugrundeliegenden Tabellendaten können demnach als Vergleichsgröße für die Ergebnisse dynamischer Gebäudesimulationen (unter Ansatz der vor Ort gemessenen, in-stationären Randbedingungen) herangezogen werden.

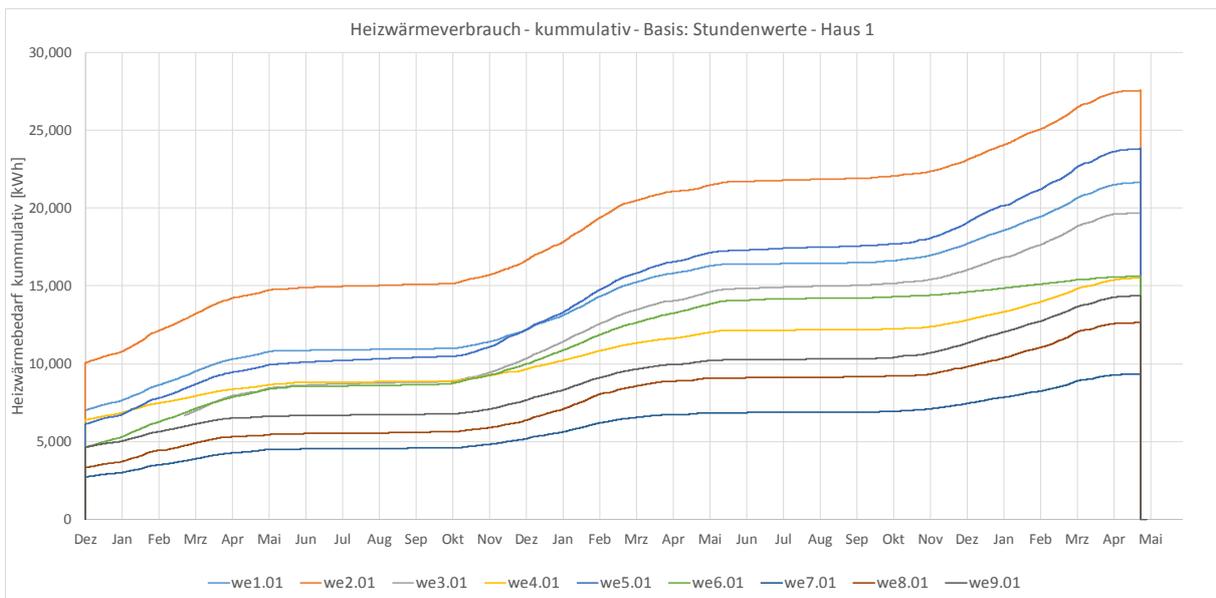


Abbildung 25 Heizwärmeverbrauch Haus 1 – Zeitraum 12/2015 – 04/2018

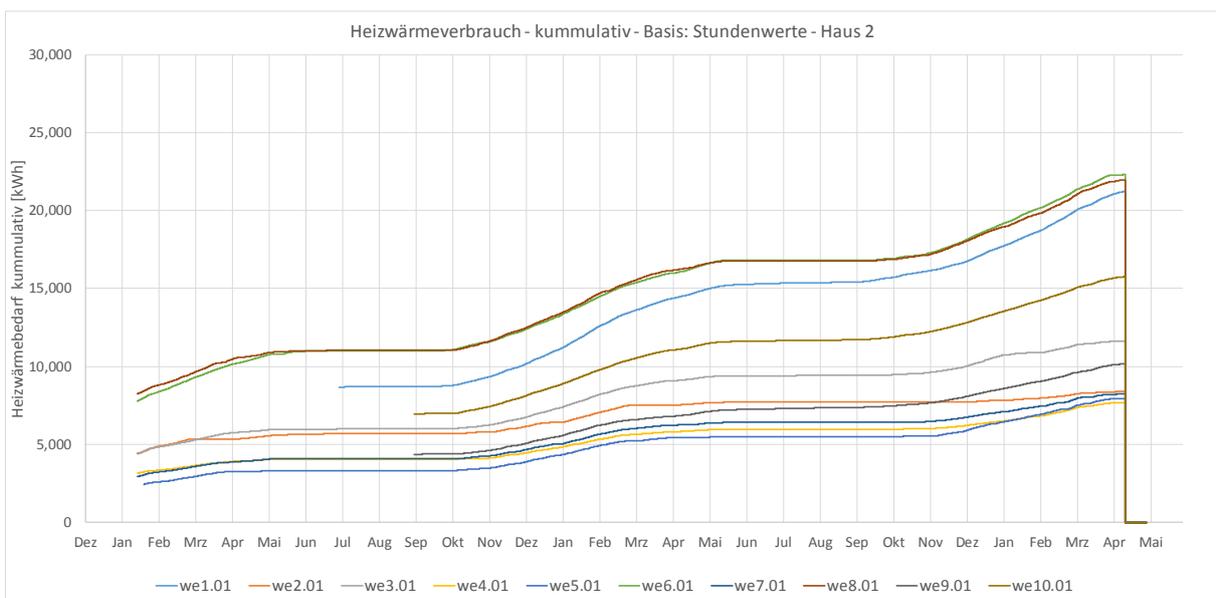


Abbildung 26 Heizwärmeverbrauch Haus 2 – Zeitraum 01/2016 – 04/2018

Der Start der Messwerterfassung in Haus 2 erfolgte im Januar 2016. Auf Grund von Leitungsproblemen (sehr große Leitungslängen in das Obergeschoss) in Haus 2 mussten jedoch anfangs verschiedene Varianten zur Anbindung der WE 9 und 10 getestet werden. Die Einbindung dieser Wohneinheiten konnte aus diesem Grund erst im Juli 2016 / August 2016 erfolgen. Als Vergleichszeiträume für die energetische Gebäudesimulation stehen daher die Heizperioden 2016/2017 sowie 2017/2018 zur Verfügung.

Bei der Betrachtung der Daten für Haus 3 ist zu beachten, dass die Wohneinheiten bis Anfang 2017 überwiegend leer standen. Leider wurden im Rahmen der Besichtigungen mit Miet- bzw. Kaufinteressenten regelmäßig sämtliche Sicherungen in einzelnen WE abgeschaltet und so auch die Stromzufuhr zum Wärmemengenzähler unterbrochen. Daher wird insbesondere im Winter das Messergebnis für den Wärmebezug verfälscht. Die ebenfalls nicht in diesen Zeiträumen nicht erfassten Verbrauchsmengen an Trinkwasser (Impulszählung) können hingegen vernachlässigt werden, da in dieser Zeit naturgemäß keine Abnahme stattfand. Tabelle 6 beinhaltet einen Überblick über die betroffenen Zeiträume und WE.

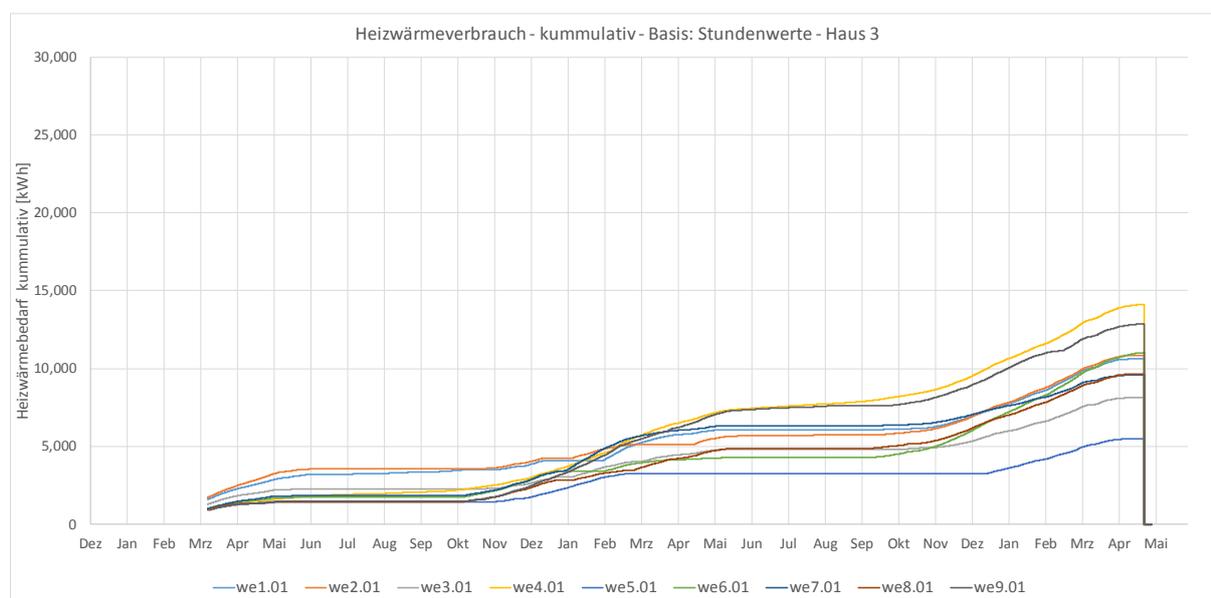


Abbildung 27 Heizwärmeverbrauch Haus 3 – Zeitraum 03/2016 – 04/2018

Tabelle 6 Übersicht zu Zeiträumen ohne Messdaten in Haus 3

Wohneinheit	Abschaltzeitraum	Grund
WE 1	14.12.2016 – 30.01.2017	Eingriff Makler / Vermieter
WE 2	08.06.2016 – 21.06.2016	Eingriff Makler / Vermieter
WE 2	14.12.2016 – 05.01.2017	Eingriff Makler / Vermieter
WE 3	22.12.2016 – 05.01.2017	Eingriff Makler / Vermieter
WE 6	22.12.2016 – 31.01.2017	Eingriff Makler / Vermieter
WE 8	22.12.2016 – 05.01.2017	Eingriff Makler / Vermieter

In den folgenden Abbildungen sind die kumulierten Elektroenergieverbräuche der WE in den drei Gebäuden dargestellt. Da Haus 3 anfangs unbelegt war (bis ca. Q1/2017) wurden hier zunächst nur sporadisch Verbrauchswerte gemessen.

Als konfliktreich erweist sich an dieser Stelle die Anbindung der Stromzähler an das M-Bus-Netz über M-Bus-Module, welche mit einer optischen Schnittstelle mit dem Zähler kommunizieren. In zwei Fällen (Haus 2) traten zeitweilig massive Probleme in der Datenübermittlung vom Zähler zum M-Bus-Modul auf, welche auf geringe Abweichungen in der Positionierung des Moduls (ggf. thermische Bewegungen) oder auch auf Fremdlichteinfall zurückzuführen sind. Betroffen war der Zähler für WE 8 im Zeitraum vom 24.01. bis zum 20.02.2017 sowie im Zeitraum vom 25.06. bis zum 13.10.2017. Die Daten wurden an dieser Stelle interpoliert.

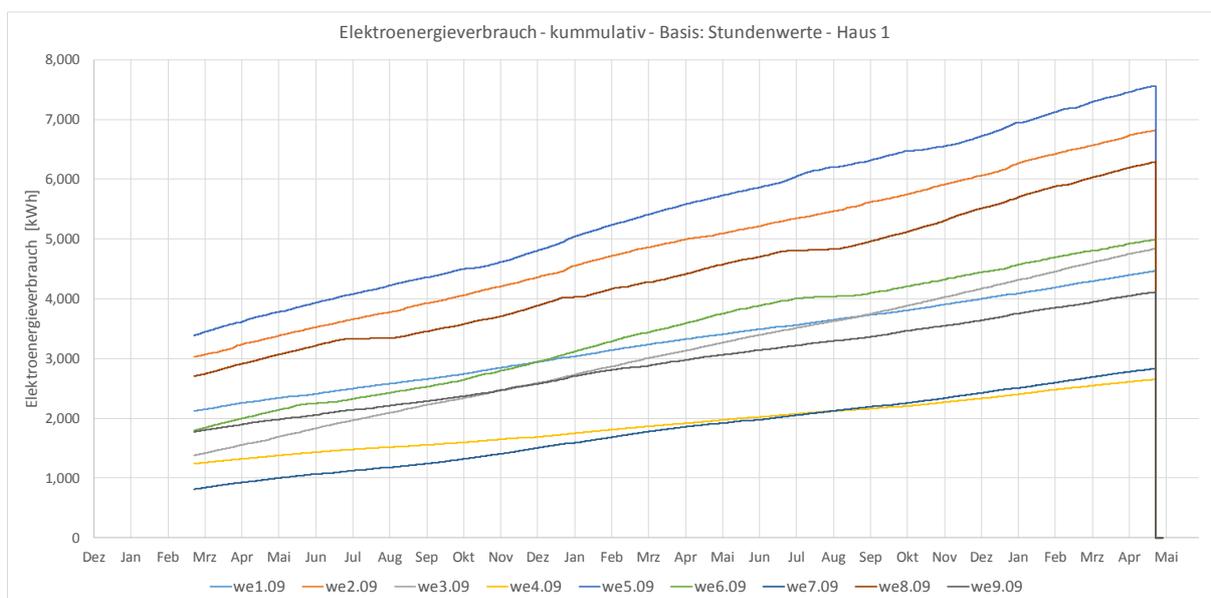


Abbildung 28 Elektroenergieverbrauch Haus 1 – Zeitraum 03/2016 – 04/2018

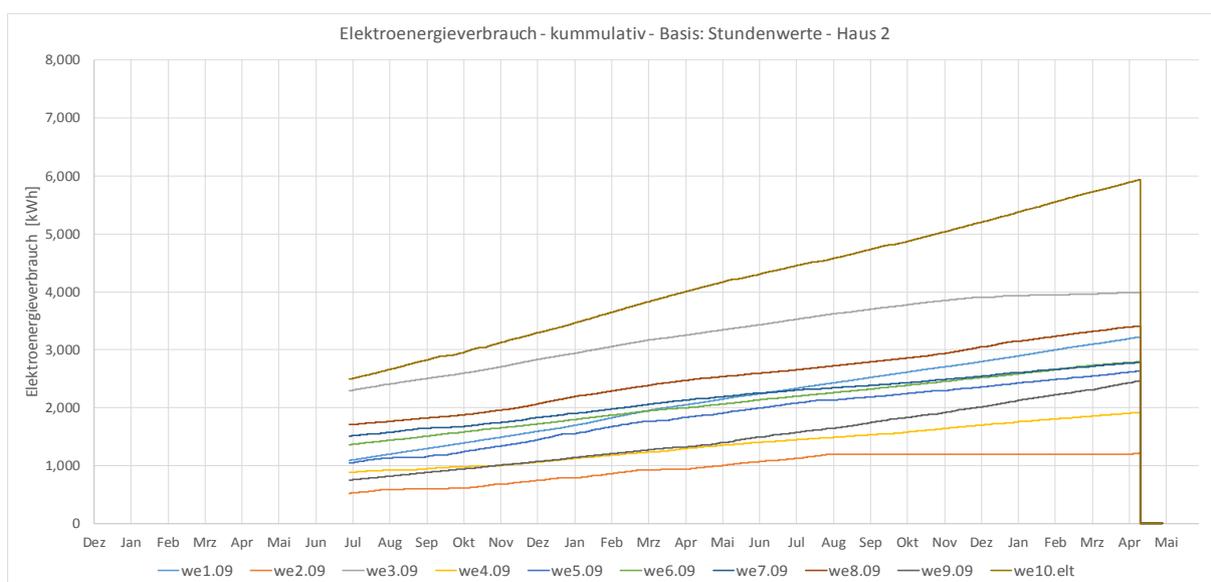


Abbildung 29 Elektroenergieverbrauch Haus 2 – Zeitraum 06/2016 – 04/2018

Die Erfassung der Daten begann in den Häusern 1 und 2 im ersten Halbjahr 2016, so dass die Auswertung der Daten und der Vergleich der Verbrauchswerte für diese beiden Gebäude beginnend mit dem 01.10.2016 sinnvoll ist. Ein Vergleich mit den Verbrauchswerten aus Haus 3 erscheint frühestens ab dem 2. Quartal 2017 zielführend, da erst zu diesem Zeitpunkt eine relevante Belegung gegeben ist. Prinzipiell sollten vergleichende Betrachtungen auf der Basis der WE-weise verfügbaren Daten erfolgen, wobei die jeweils herrschenden Randbedingungen (WE belegt / unbelegt, Mieterwechsel, Anzahl der Personen) genau hinterfragt werden müssen.

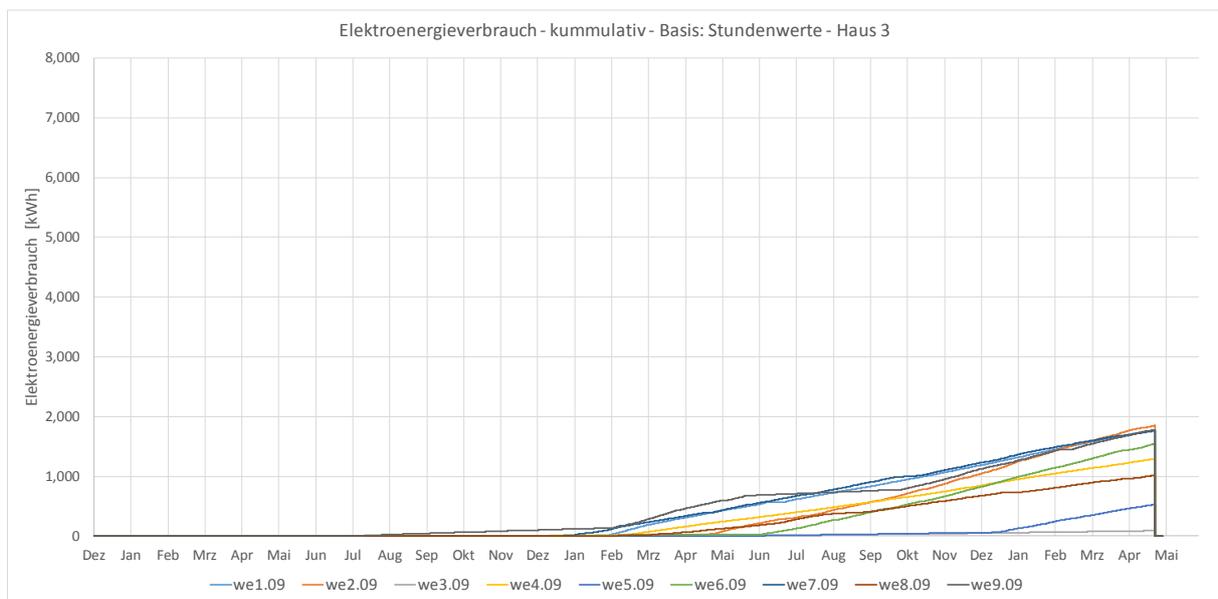


Abbildung 30 Elektroenergieverbrauch Haus 3 – Zeitraum 06/2016 – 04/2018

Bei der Analyse der Wasserverbrauchswerte (vgl. nachfolgende Ausführungen) ist zu beachten, dass lediglich die Zähler an den Zapfstellen innerhalb der WE mit M-Bus-Geräten ausgestattet wurden. In allen drei Gebäuden existieren jedoch Waschkeller, in denen die Mieter die Möglichkeit haben, ihre Waschmaschine aufzustellen und zu betreiben. Die dafür vorgesehenen Zapfstellen verfügen ebenfalls über Wasserzähler, welche jedoch aus Aufwandsgründen nicht in die M-Bus-Erfassung eingebunden wurden.

Es wird daher eine separate Auswertung vorgenommen, in der die Wasserverbräuche der Waschmaschinen über die Gesamtbetrachtungszeit ermittelt und pauschal auf die in den WE ermittelten Kaltwasserverbrauchswerte aufgeteilt werden.

Die nachfolgenden Abbildungen beinhalten die grafischen Darstellungen zu den verbrauchten Warm- und Kaltwassermengen, welche jeweils kurz erläutert werden.

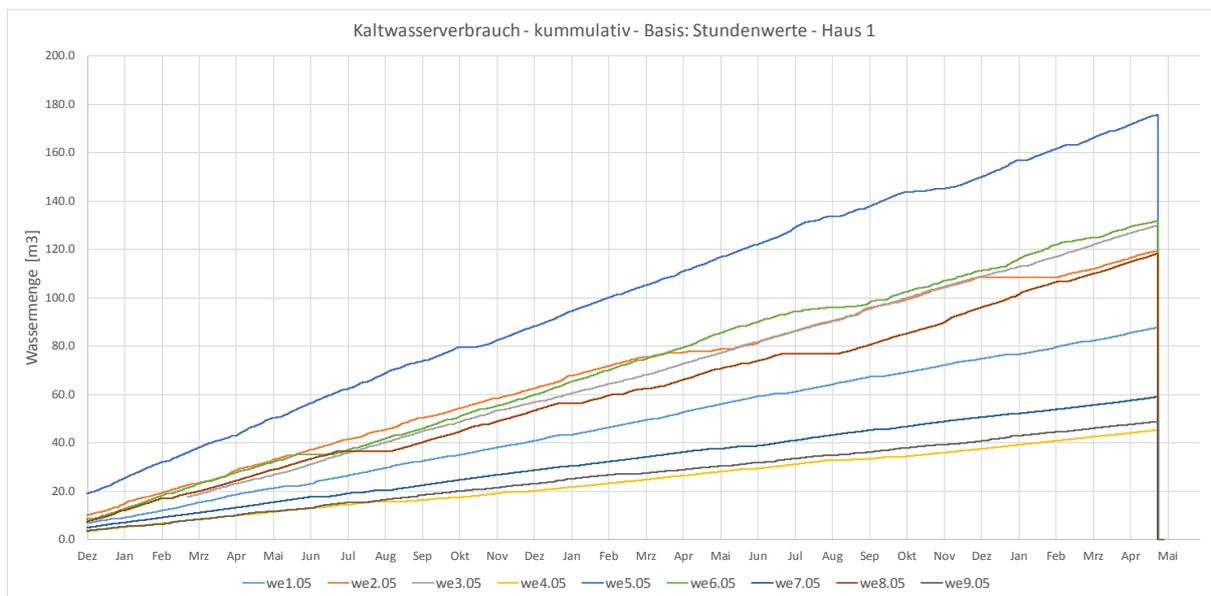


Abbildung 31 Kaltwasserverbrauch Haus 1

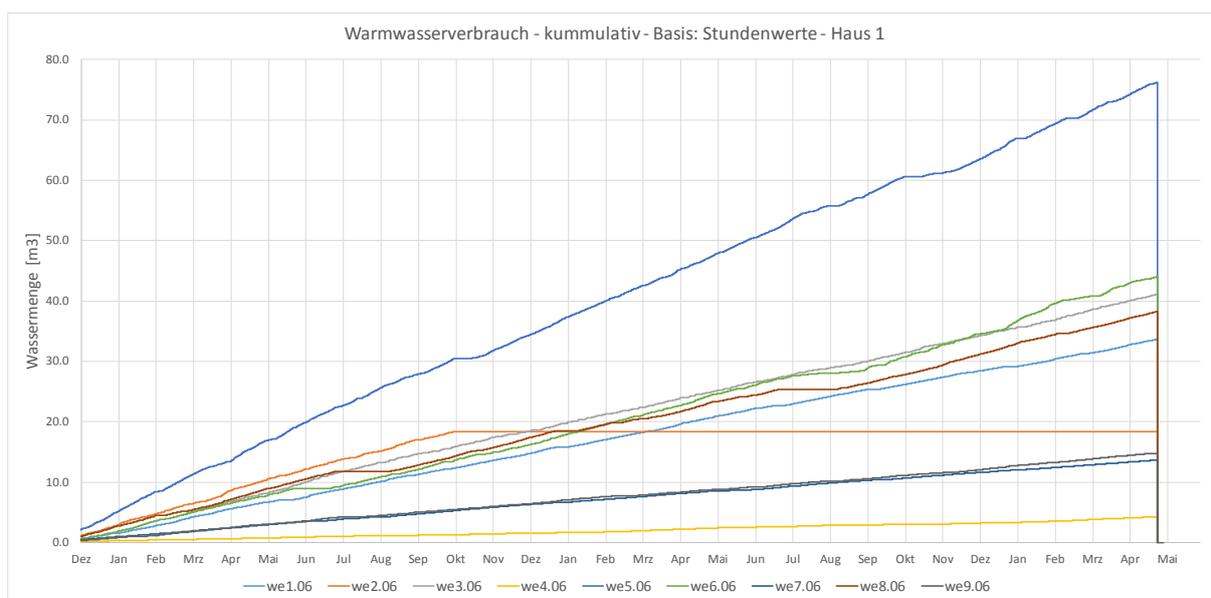


Abbildung 32 Warmwasserverbrauch Haus 1

In Haus 1 ist ein sehr homogenes Nutzerverhalten zu beobachten. Der Wasserverbrauch erfolgt mit wenigen Ausnahmen (WE 6 und WE 8) über den gesamten Betrachtungszeitraum kontinuierlich. Das M-Bus-Gerät am Warmwasserzähler in der WE 2 fiel im Herbst 2016 aus und konnte nicht instandgesetzt werden. Für die vergleichende Betrachtung der Verbrauchswerte unterschiedlicher WE können die fehlenden Werte anhand der Daten aus der Betriebskostenabrechnung und dem zuvor beobachteten Entnahmeverhalten abgebildet werden. Die Analyse des zeitlich differenzierten Wasserverbrauchs (Gleichzeitigkeit) kann auf den erfassten Rohroberflächen-Temperaturwerten an den Zapfstellen basierend erfolgen.

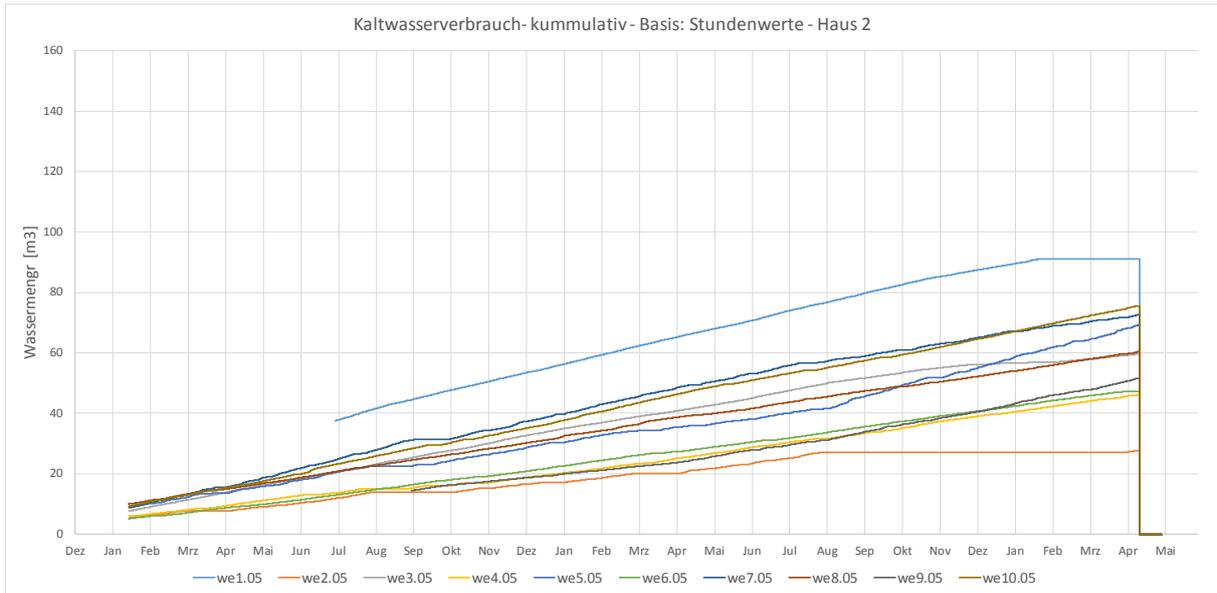


Abbildung 33 Kaltwasserverbrauch Haus 2

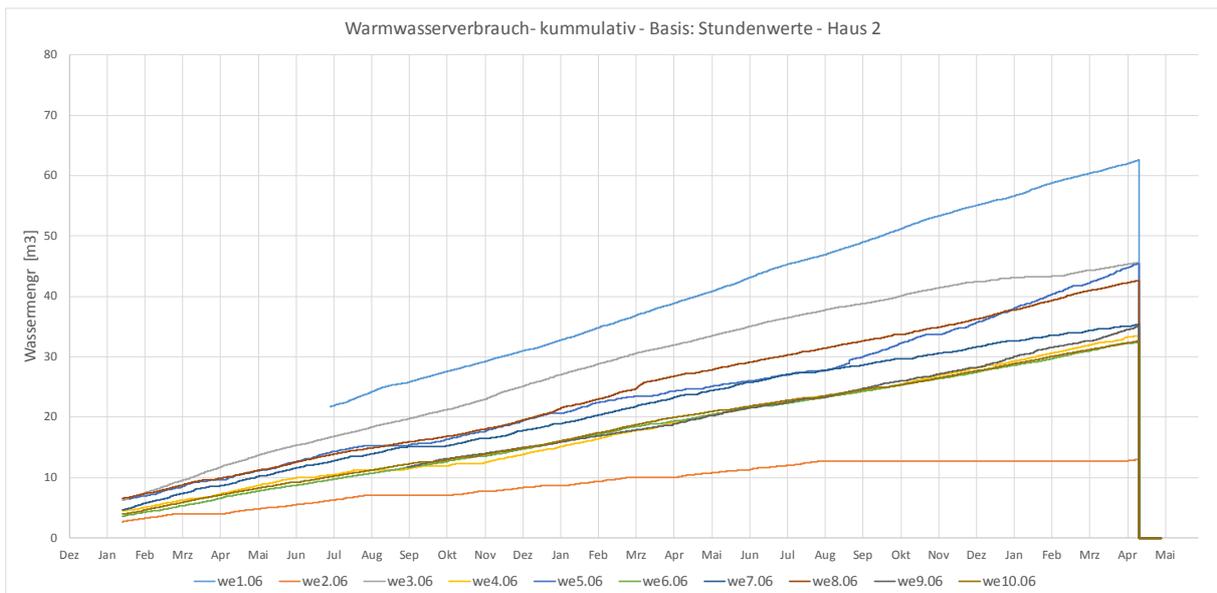


Abbildung 34 Warmwasserverbrauch Haus 2

Die Verbrauchswerte in Haus 2 sind weitgehend vollständig, ein Ausfall eines M-Bus-Moduls musste lediglich in der WE 2 (Warmwasserzähler) registriert werden. Für die vergleichende Betrachtung der Verbrauchswerte und die Analyse des Entnahmeverhaltens wird die bereits für Haus 1 beschriebene Vorgehensweise umgesetzt.

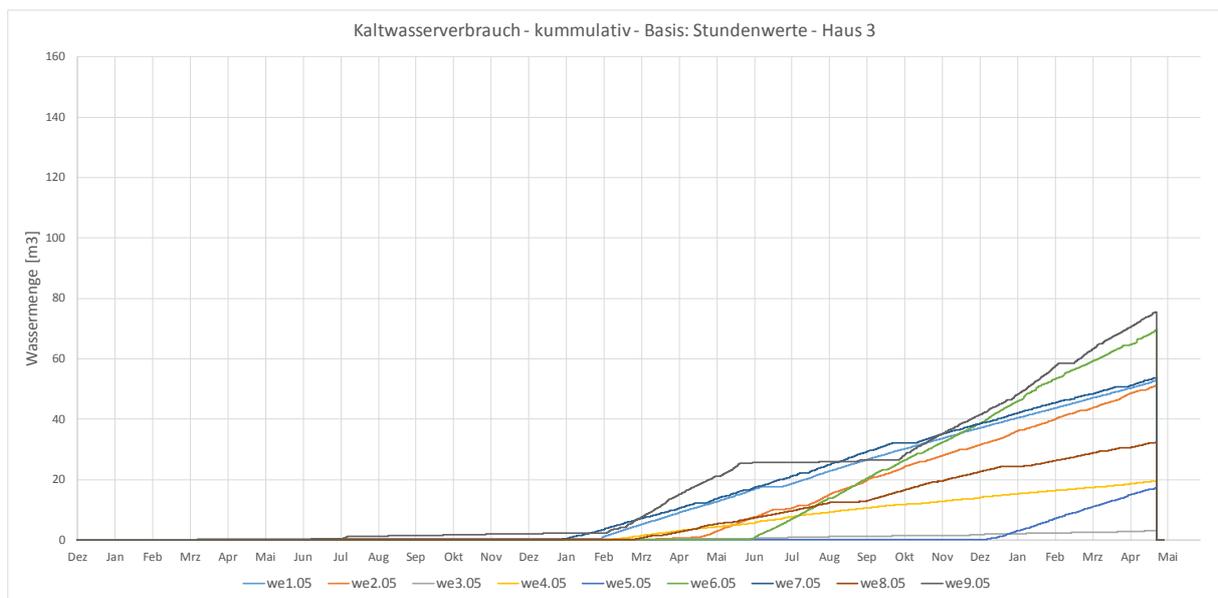


Abbildung 35 Kaltwasserverbrauch Haus 3

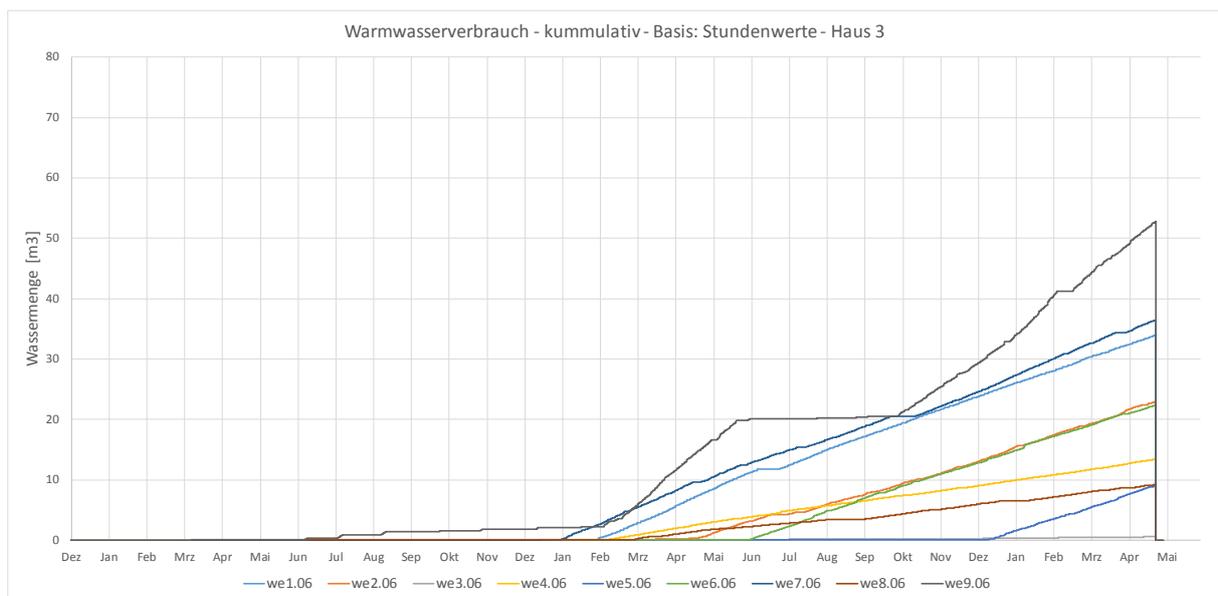


Abbildung 36 Warmwasserverbrauch Haus 3

In Haus 3 kann eine Verbrauchsanalyse sinnvoll erst am dem 1. Quartal 2017 erfolgen, da bis zum Ende 2016 nur eine WE bewohnt war. Die Erfassungsgeräte in diesem Haus liefern bis zum Ende der Datenaufzeichnung plausible Werte.

Zur Plausibilisierung der erfassten Werte wurde zusätzlich ein Abgleich der Messergebnisse mit den Abrechnungsdaten des Dienstleisters für die Verbrauchsmengenerfassung zur Betriebskostenabrechnung (BKA) (verfügbar für Haus 1 und Haus 2) vorgenommen. Die tatsächlichen Ablesezeitpunkte wurden telefonisch bei der ista Deutschland GmbH erfragt, so dass vergleichbare Zeiträume betrachtet werden können. Anhand der entsprechenden Zäh-

lerstände wurden die Verbrauchswerte für Trinkwasser und Wärme miteinander verglichen. Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick zu diesem Vergleich.

Tabelle 7 Vergleich der Messdaten mit den Werten der BKA (Haus 1 - Wasserzähler)

Zähler			16.02.2016		16.01.2017		22.01.2018		2017			2018		
			ISTA	IMoSUB	ISTA	IMoSUB	ISTA	IMoSUB	ISTA	IMoSUB	Delta	ISTA	IMoSUB	Delta
we	01	kalt	50.94	13.326	82.23	44.657	115.88	78.32	31.29	31.331	0.04	33.65	33.663	0.01
		warm												
we	02	kalt	87.07	21.524	135.53	69.667	185.8	108.58	48.46	48.143	-0.32	50.27	38.913	-11.357
		warm												
we	03	kalt	36.39	-	81.74	62.198	134.96	115.486	45.35	-	-	53.22	53.288	0.068
		warm												
we	04	kalt	36.66	7.511	51.45	22.359	69.24	40.133	14.79	14.848	0.06	17.79	17.774	-0.016
		warm												
we	05	kalt	109.9	34.509	172.42	97.174	234.74	159.582	62.52	62.665	0.15	62.32	62.408	0.088
		warm												
we	06	kalt	55.35	20.072	102.54	67.448	154.77	119.7	47.19	47.376	0.19	52.23	52.252	0.022
		warm												
we	07	kalt	15.59	9.987	36.74	31.199	50.67	53.142	21.15	21.212	0.06	13.93	21.943	8.013
		warm												
we	08	kalt	64.86	18.149	104.05	57.442	151.46	104.873	39.19	39.293	0.10	47.41	47.431	0.021
		warm												
we	09	kalt	34.02	7.47	52.43	25.916	70.51	43.985	18.41	18.446	0.04	18.08	18.069	-0.011
		warm												

Der abweichende Wert für WE 2 im Abrechnungsjahr 2018 ist auf den erwähnten Ausfall des M-Bus-Moduls am Kaltwasserzählers zurückzuführen. Der Vergleich für die WE 3 ist nur für 2017 möglich, da die Aufzeichnung der Daten hier erst nach Ablesung im Jahr 2016 begann.

Tabelle 8 Vergleich der Messdaten mit den Werten der BKA (Haus 2 - Wasserzähler)

Zähler			16.02.2016		16.01.2017		22.01.2018		2017			2018		
			ISTA	IMoSUB	ISTA	IMoSUB	ISTA	IMoSUB	ISTA	IMoSUB	Delta	ISTA	IMoSUB	Delta
we	01	kalt	7.47	-	18.38	57.715	27.47	91.084	10.91	-	-	9.09	33.369	24.28
		warm	3.85	-	9.16	33.649	12.63	58.025	5.31	-	-	3.47	24.376	20.906
we	02	kalt	22.47	7.006	58.86	17.89	91.26	27.028	36.39	10.884	-25.5	32.4	9.138	-23.262
		warm	12.19	3.678	34.48	8.983	58.18	12.695	22.29	5.305	-17.0	23.7	3.712	-19.988
we	03	kaltB	35.31	8.246	56.61	29.538	73.33	46.247	21.3	21.292	0.0	16.72	16.709	-0.011
		warmB	26.14	7.611	44.12	25.592	58.22	39.693	17.98	17.981	0.0	14.1	14.101	0.001
		kaltF	7.08	1.906	11.53	6.384	15.75	10.606	4.45	4.478	0.0	4.22	4.222	0.002
		warmF	2.35	0.893	3.67	2.309	5.03	3.582	1.32	1.416	0.1	1.36	1.273	-0.087
we	04	kalt	19.54	7.343	33.05	20.873	53.81	41.614	13.51	13.53	0.0	20.76	20.741	-0.019
		warm	12.59	5.692	22.6	15.726	37.01	30.113	10.01	10.034	0.0	14.41	14.387	-0.023
we	05	kalt	11.84	11.231	32.25	31.632	61.3	60.643	20.41	20.401	0.0	29.05	29.011	-0.039
		warm	7.95	7.774	21.65	21.469	39.65	39.438	13.7	13.695	0.0	18	17.969	-0.031
we	06	kaltB	19.81	5.62	35.63	20.896	51.47	38.219	15.82	15.276	-0.5	15.84	17.323	1.483
		warmB	9.47	2.993	17.26	10.536	24.24	18.231	7.79	7.543	-0.2	6.98	7.695	0.715
		kaltF	2.4	0.747	4.39	2.552	6.9	5.338	1.99	1.805	-0.2	2.51	2.786	0.276
		warmF	5.13	1.736	9.57	6.015	14.08	11.017	4.44	4.279	-0.2	4.51	5.002	0.492
we	07	kalt	40.87	11.718	70.43	41.219	97.31	68.142	29.56	29.501	-0.1	26.88	26.923	0.043
		warm	20.17	6.442	33.31	19.546	46.87	33.14	13.14	13.104	0.0	13.56	13.594	0.034
we	08	kaltB	31.44	10.247	49.4	28.213	67.88	46.687	17.96	17.966	0.0	18.48	18.474	-0.006
		warmB	11.55	3.787	18.3	10.532	25.71	17.942	6.75	6.745	0.0	7.41	7.41	0
		kaltF	5.56	1.831	12.36	5.067	12.36	8.627	6.8	3.236	-3.6	0	3.56	3.56
		warmF	11.37	4.187	27.29	11.56	28.06	20.879	15.92	7.373	-8.5	0.77	9.319	8.549
we	09	kalt	14.03	-	32.75	20.547	58.15	45.139	18.72	-	-	25.4	24.592	-0.808
		warm	11.35	-	26.04	16.377	41.24	31.089	14.69	-	-	15.2	14.712	-0.488
we	10	kalt	28.33	11.96	54.84	39.255	83.62	68.804	26.51	27.295	0.8	28.78	29.549	0.769
		warm	12.1	5.266	23.06	16.714	35.53	29.578	10.96	11.448	0.5	12.47	12.864	0.394

Im Gebäude 2 ergab der Vergleich ebenfalls plausible Werte, es wurde allerdings festgestellt, dass im Rahmen der Ablesung durch den Ablesedienst offenbar die Zähler der WE 1

und 2 vertauscht wurden. Eine Überprüfung der Wasser-Zählernummern vor Ort in WE 1 bestätigte diesen Verdacht – der Vermieter wurde darüber in Kenntnis gesetzt.

1.4.3.2 Verbrauchsmonitoring – Warm- und Kaltwassertemperaturen

Ein wesentliches Element zur Abbildung des Nutzerverhaltens bzw. zur Überlagerung des zeitlichen Anfalls von Trinkwasserentnahmevorgängen wurde mit der permanenten Messung der Oberflächentemperaturen an den Warm- und Kaltwasserentnahmestellen in den WE realisiert. Die Erfassung der Temperaturen erfolgte im 30-Sekunden-Takt mittels 1wire-Sensoren, die mit Wärmeleitpaste an den Rohroberflächen angelegt und mit einer Wärmedämmung versehen wurden.

Die Datenmenge für diesen Teilbereich umfasst pro Messstelle ca. 2,8 Mio. Einzelwerte (unter der Annahme, dass vom 01.10.2015 bis zum 31.05.2018 eine lückenlose Erfassung stattgefunden hat). In der Praxis ist dies kaum möglich – es existieren unter allen Umständen kleinere Datenlücken. Angesichts der enormen Datenmenge ist eine visuelle Überprüfung der Datensätze auf Vollständigkeit / Datenlücken und unplausibler Temperaturwerte nicht zielführend. Sinnvoller erscheint die Auswertung der Daten in Matrixform. Es wurden pro Einzelwert 4 Matrizes erstellt, deren Aufbau in der folgenden Tabelle dargestellt ist.

Tabelle 9 Aufbau der Matrizes zur Auswertung der erfassten Wassertemperaturen

Zeitraum	Spalten (Tage)	Zeilen (30 Sek.-Intervalle)	Matrix-Elemente
01.10.2015 – 31.12.2015	92	2.880	264.960
01.01.2016 – 31.12.2016	366	2.880	1.054.080
01.01.2017 – 31.12.2017	365	2880	1.051.200
01.01.2018 – 31.05.2018	151	2880	434.880

Die erfassten Einzeltemperaturwerte wurden zunächst in die jeweilige Matrix eingeordnet. Anschließend konnte anhand der Anzahl der gefüllten Matrixelemente die Datenverfügbarkeit beurteilt werden. Die nachfolgenden Tabellen enthalten Auflistungen aller Wasserentnahmestellen, die Anzahl der dort erfassten in 2016 und 2017 Datensätze sowie die Minimal- und Maximal-Temperaturen.

Tabelle 10 Übersicht zur Datenverfügbarkeit – Trinkwassertemperaturen Haus 1

Entnahmestelle	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]
Haus 1, WE 01, KWZ	2.105.080	99,99	6,8	33,1
Haus 1, WE 01, WWZ	2.105.080	99,99	17,3	58,0
Haus 1, WE 02, KWZ	2.044.593	97,12	9,2	34,8
Haus 1, WE 02, WWZ	2.044.591	97,12	20,4	65,0
Haus 1, WE 03, KWZ	1.992.369	94,64	13,9	28,3
Haus 1, WE 03, WWZ	1.992.369	94,64	18,9	33,7
Haus 1, WE 04, KWZ	2.103.958	99,94	6,8	33,4
Haus 1, WE 04, WWZ	2.103.958	99,94	18,9	56,7

Fortsetzung Tabelle 10

Entnahmestelle	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]
Haus 1, WE 05, KWZ	2.080.274	98,81	8,9	39,8
Haus 1, WE 05, WWZ	2.080.273	98,81	22,1	59,9
Haus 1, WE 06, KWZ	2.105.111	99,99	8,3	30,6
Haus 1, WE 06, WWZ	2.105.112	99,99	18,6	38,4
Haus 1, WE 07, KWZ	2.075.931	98,61	9,4	29,6
Haus 1, WE 07, WWZ	2.075.930	98,61	21,5	54,1
Haus 1, WE 08, KWZ	2.042.755	97,03	11,4	34,6
Haus 1, WE 08, WWZ	2.042.755	97,03	21,3	61,4
Haus 1, WE 09, KWZ	2.092.673	99,4	8,8	33,8
Haus 1, WE 09, WWZ	2.092.673	99,4	24,3	60,3

Tabelle 11 Übersicht zur Datenverfügbarkeit – Trinkwassertemperaturen Haus 2

Entnahmestelle	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]
Haus 2, WE 01, KWZ	1.786.807	84,87	12,4	27,6
Haus 2, WE 01, WWZ	1.786.805	84,87	22,8	58,8
Haus 2, WE 02, KWZ	2.086.723	99,12	10,3	28,6
Haus 2, WE 02, WWZ	2.086.724	99,12	21,4	62,8
Haus 2, WE 03, KWZ 1	2.093.225	99,43	13,3	26,8
Haus 2, WE 03, WWZ 1	2.093.225	99,43	17,9	54,9
Haus 2, WE 03, KWZ 2	2.093.221	99,43	13,4	26,3
Haus 2, WE 03, WWZ 2	2.093.217	99,43	13,6	47,3
Haus 2, WE 04, KWZ	2.032.925	96,56	15,0	26,8
Haus 2, WE 04, WWZ	2.032.927	96,65	20,8	51,1
Haus 2, WE 05, KWZ	2.102.293	99,86	11,9	29,3
Haus 2, WE 05, WWZ	2.102.291	99,86	19,9	56,1
Haus 2, WE 06, KWZ 1	2.103.074	99,9	13,4	32,9
Haus 2, WE 06, WWZ 1	2.103.072	99,9	22,9	53,9
Haus 2, WE 06, KWZ 2	2.103.071	99,9	15,9	22,8
Haus 2, WE 06, WWZ 2	2.103.073	99,9	16,1	46,3
Haus 2, WE 07, KWZ	2.103.131	99,9	13,5	26,9
Haus 2, WE 07, WWZ	2.103.131	99,9	21,8	54,7
Haus 2, WE 08, KWZ 1	2.102.437	99,86	15,7	28,7
Haus 2, WE 08, WWZ 1	2.102.436	99,86	23,1	49,8
Haus 2, WE 08, KWZ 2	2.102.437	99,86	15,9	29,4
Haus 2, WE 08, WWZ 2	2.102.434	99,86	18,1	48,9

Fortsetzung Tabelle 11

Entnahmestelle	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]
Haus 2, WE 09, KWZ	2.097.526	99,63	14,3	29,3
Haus 2, WE 09, WWZ	2.097.526	99,63	23,3	55,1
Haus 2, WE 10, KWZ	2.049.304	97,34	13,3	31,3
Haus 2, WE 10, WWZ	2.049.304	97,34	24,5	53,8

Tabelle 12 Übersicht zur Datenverfügbarkeit – Trinkwassertemperaturen Haus 3

Entnahmestelle	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]
Haus 3, WE 01, KWZ 1	2.102.962	99,89	12,7	25,8
Haus 3, WE 01, WWZ 1	2.102.960	99,89	12,9	60,1
Haus 3, WE 01, KWZ 2	2.102.961	99,89	9,6	26,3
Haus 3, WE 01, WWZ 2	1.102.963	99,89	11,8	48,3
Haus 3, WE 02, KWZ 1	2.053.803	97,55	7,3	25,4
Haus 3, WE 02, WWZ 1	2.053.803	97,55	14,1	57,7
Haus 3, WE 02, KWZ 2	2.053.803	97,55	11,1	28,7
Haus 3, WE 02, WWZ 2	2.053.802	97,55	11,1	54,8
Haus 3, WE 03, KWZ	2.103.317	99,91	9,4	26,3
Haus 3, WE 03, WWZ	2.103.317	99,91	13,1	58,9
Haus 3, WE 04, KWZ	2.103.323	99,91	11,7	26,3
Haus 3, WE 04, WWZ	2.103.323	99,91	13,0	51,9
Haus 3, WE 05, KWZ 1	2.084.750	99,02	10,1	27,3
Haus 3, WE 05, WWZ 1	2.084.750	99,02	15,3	50,2
Haus 3, WE 05, KWZ 2	2.084.750	99,02	11,4	29,4
Haus 3, WE 05, WWZ 2	2.084.750	99,02	11,3	52,2
Haus 3, WE 06, KWZ	2.100.851	99,79	7,1	27,9
Haus 3, WE 06, WWZ	2.100.851	99,79	13,8	55,5
Haus 3, WE 07, KWZ	2.103.329	99,91	10,2	27,5
Haus 3, WE 07, WWZ	2.103.329	99,91	12,1	53,6
Haus 3, WE 08, KWZ 1	2.098.921	99,70	10,6	27,6
Haus 3, WE 08, WWZ 1	2.098.921	99,70	12,6	53,3
Haus 3, WE 08, KWZ 2	2.098.919	99,7	10,5	28,9
Haus 3, WE 08, WWZ 2	2.098.920	99,70	10,3	43,3
Haus 3, WE 09, KWZ	2.103.325	99,91	9,4	28,7
Haus 3, WE 09, WWZ	2.103.327	99,91	11,8	54,9

Im Wesentlichen können gute Datenverfügbarkeitsraten von nahezu 99 % dokumentiert werden. Lediglich in Haus 2, WE 01 mussten Einbußen in Kauf genommen werden, da hier rein technisch ungünstige Anschlussbedingungen herrschten. Neben den tatsächlich fehlenden

Datensätzen wurden einige Fehlerwerte (die Sensoren geben als Fehlerwert 85 °C aus) erkannt. Die betrifft maximal 5 Werte pro Sensor und kann daher bei der Analyse der Gleichzeitigkeiten einfach korrigiert werden. Grundsätzlich scheinen daher zunächst alle erfassten Datenreihen als Eingangsgrößen für weitere Betrachtungen geeignet.

Die unterschiedlichen Min-/Max-Temperaturen resultieren in erster Linie aus unterschiedlichen Umgebungsbedingungen im Bereich der Sensoren. Die Anlegefühler wurden zwar mit einer Wärmeleitpaste angebracht und gedämmt – dennoch unterliegen Sie dem Einfluss der Randbedingungen innerhalb der Installationsschachtes.

Im Rahmen der Plausibilisierung wurden zwei vertauschte Sensorpaare identifiziert. Dabei handelt es sich um Anschlüsse in Haus 3 in WE 3 und WE 5 (hier der Sekundäranschluss). In beiden Fällen wurde der Kalt- mit dem Warmwasseranschluss vertauscht, was bei der Auswertung entsprechend zu berücksichtigen ist.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der Prüfmatrix, in der die Messwerte sequentiell der Validierung unterzogen wurden. In den Spalten der Matrix wurden die Tage aufgetragen, in den Zeilen ein 30-Sekundenintervall. Mittels der Matrices ist eine relativ zügige Prüfung der Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität möglich.

	B	JC	JD	JE	JF	JG	JH	JI	JJ	JK	JL	JM	JN	JO	JP	JQ	JR	JS	JT	JU	JV	JW	JX	JY	JZ	KA	KB	KC	KD	KE	KF	KG
1	2016																															
2	Jul																															
3	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1016	08:25:30	25.44	34.63	25.75	32.56	29.56	32.81	30.38	36.44	27.31	27.19	39.00	26.31	36.75	41.19	35.00	26.63	26.69	36.56	31.50	26.25	25.44	28.56	25.94	28.31	26.94	27.19	26.81	26.50	39.44	25.94	34.81
1017	08:26:00	25.44	34.50	25.75	32.44	29.50	35.63	30.31	36.31	27.31	27.19	38.81	26.31	36.63	41.00	34.88	26.56	26.69	36.44	31.44	26.25	25.44	28.50	25.88	28.25	26.94	27.19	26.81	26.50	39.31	25.94	34.69
1018	08:26:30	25.50	34.38	25.69	32.38	29.50	36.56	30.25	36.19	27.31	27.13	38.69	26.31	36.50	40.81	34.75	26.63	26.69	36.25	31.38	26.25	25.44	28.44	25.88	28.25	26.94	27.19	26.75	26.50	39.19	25.94	34.56
1019	08:27:00	25.44	34.25	25.69	32.31	29.44	36.88	30.19	36.13	27.25	27.13	38.56	26.25	36.38	40.63	34.63	26.56	26.69	36.19	31.31	26.25	25.44	28.44	25.88	28.19	26.94	27.13	26.75	26.50	39.06	25.94	34.44
1020	08:27:30	25.44	34.13	25.69	32.19	29.38	36.94	30.19	35.94	27.19	27.13	38.38	26.25	36.25	40.44	34.56	26.56	26.69	36.06	31.25	26.25	25.44	28.38	25.88	28.19	26.94	27.13	26.75	26.44	38.94	25.94	34.38
1021	08:28:00	25.50	34.00	25.69	32.13	29.31	36.88	30.13	35.81	27.19	27.13	38.19	26.25	36.13	40.25	34.50	26.56	26.69	35.94	31.19	26.25	25.44	28.31	25.88	28.13	26.94	27.13	26.75	26.50	38.81	25.94	34.25
1022	08:28:30	25.44	33.88	25.69	32.06	29.31	39.13	30.06	35.69	27.19	27.13	38.06	26.25	36.00	40.06	34.38	26.56	26.69	35.81	31.13	26.25	25.44	28.31	25.81	28.13	26.94	27.13	26.75	26.44	38.63	25.94	34.13
1023	08:29:00	25.50	33.81	25.63	31.94	29.25	39.56	30.00	35.63	27.19	27.13	37.94	26.25	35.88	39.88	34.25	26.56	26.69	35.63	31.06	26.25	25.38	28.25	25.81	28.06	26.94	27.13	26.75	26.44	38.50	25.94	34.00
1024	08:29:30	25.44	33.69	25.63	31.88	29.19	39.63	29.94	35.50	27.19	27.06	37.75	26.25	35.75	39.69	34.19	26.50	26.63	35.50	31.00	26.19	31.88	28.25	25.81	28.06	26.94	27.06	26.69	26.44	38.31	25.94	33.94
1025	08:30:00	25.44	33.56	25.63	31.81	29.19	39.63	29.94	35.38	27.13	27.06	37.63	26.25	35.69	39.56	34.06	26.56	26.63	35.44	30.94	26.19	34.56	28.19	25.81	28.00	26.94	27.06	26.75	26.44	38.19	25.94	33.88
1026	08:30:30	25.44	33.50	25.63	31.75	29.13	39.56	29.88	35.25	27.13	27.06	37.44	26.25	35.56	39.31	34.00	26.56	26.63	35.31	30.88	26.19	36.56	28.13	25.81	28.00	26.94	27.06	26.69	26.44	38.00	25.94	33.75
1027	08:31:00	25.50	33.38	25.63	31.63	29.06	39.44	29.81	35.13	27.13	27.00	37.31	26.25	35.44	39.19	33.94	26.50	26.56	35.19	30.81	26.19	37.06	28.13	25.81	27.94	26.94	27.06	26.69	26.44	37.88	25.94	33.63
1028	08:31:30	25.44	33.25	25.63	31.56	29.06	39.31	29.75	35.06	27.13	27.00	37.19	26.25	35.31	39.00	33.81	26.44	26.56	35.06	30.75	26.13	37.88	28.06	25.81	27.94	26.94	27.06	26.69	26.38	37.69	25.94	33.56
1029	08:32:00	25.44	33.19	25.56	31.50	29.00	39.19	29.75	34.94	27.13	27.00	37.06	26.25	35.19	38.88	33.69	26.50	26.56	34.94	30.69	26.13	37.94	28.06	25.81	27.94	26.94	27.06	26.69	26.44	37.56	25.94	33.44
1030	08:32:30	25.44	33.13	25.56	31.44	28.94	39.00	29.69	34.88	27.13	27.00	36.94	26.25	35.06	38.69	33.63	26.50	26.50	34.88	30.63	26.13	38.00	28.00	25.75	27.88	26.94	27.00	26.69	26.38	37.44	25.94	33.38
1031	08:33:00	25.50	33.00	25.56	31.38	28.88	38.88	29.63	34.75	27.06	27.00	36.81	26.25	35.00	38.56	33.56	26.44	26.50	34.75	30.56	26.06	37.81	28.00	25.75	27.88	26.94	27.00	26.69	26.44	37.25	25.94	33.25
1032	08:33:30	25.44	32.88	25.56	31.31	28.88	38.69	29.56	34.63	27.06	27.00	36.69	26.25	34.88	38.38	33.44	26.50	26.50	34.69	30.50	26.06	37.63	31.81	25.75	27.81	26.94	27.00	26.69	26.38	37.13	25.94	33.19
1033	08:34:00	25.44	32.81	25.50	31.19	28.81	38.56	29.50	34.56	27.06	27.00	36.56	26.44	34.75	38.25	33.38	26.44	26.50	34.50	30.44	26.06	37.50	35.69	25.75	27.81	26.94	27.00	26.69	26.38	36.94	25.94	33.13
1034	08:34:30	25.44	32.69	25.56	31.19	28.81	38.31	29.50	34.44	27.00	26.94	36.44	26.25	34.69	38.13	33.21	26.44	26.50	34.44	30.44	26.06	37.38	36.94	25.75	27.75	26.88	27.00	26.69	26.38	36.88	25.94	33.00
1035	08:35:00	25.44	32.63	25.50	31.06	28.75	38.13	29.44	34.38	27.00	26.94	36.31	26.25	34.56	37.94	33.25	26.44	26.50	34.31	30.38	26.00	37.25	36.69	25.75	27.75	26.88	27.00	26.63	26.38	36.69	25.94	32.94
1036	08:35:30	25.44	32.56	25.50	31.00	28.75	38.00	29.38	34.25	27.06	26.94	36.19	26.25	34.44	37.81	33.13	26.44	26.50	34.25	30.31	26.00	37.06	36.06	25.75	27.75	26.88	26.94	26.38	26.38	36.56	25.94	32.81
1037	08:36:00	25.44	32.44	25.50	30.94	28.69	37.81	29.31	34.19	27.00	26.94	36.06	26.25	34.31	37.63	33.06	26.44	26.44	34.13	30.25	26.00	37.00	36.56	25.75	27.69	26.88	27.00	26.38	36.44	25.94	32.75	
1038	08:36:30	25.44	32.38	25.50	30.88	28.69	37.69	29.31	34.06	27.00	26.94	35.94	26.25	34.19	37.50	33.00	26.44	26.44	34.00	30.25	26.00	36.81	36.94	25.75	27.69	26.81	26.94	26.38	36.31	25.94	32.63	
1039	08:37:00	25.44	32.25	25.44	30.81	28.56	37.50	29.25	34.00	27.00	26.94	35.81	26.25	34.06	37.38	32.88	26.44	26.44	33.94	30.13	26.00	36.69	36.69	25.75	27.69	26.81	26.94	26.38	36.19	25.94	32.56	
1040	08:37:30	25.44	32.19	25.50	30.75	28.56	37.38	29.19	33.88	26.94	26.88	35.69	26.25	33.94	37.25	32.81	26.38	26.44	33.81	30.13	26.00	36.56	36.63	25.75	27.63	26.81	26.94	26.38	36.06	25.94	32.50	
1041	08:38:00	25.44	32.13	25.44	30.69	28.56	37.19	29.13	33.81	26.94	26.88	35.63	26.25	33.88	37.13	32.75	26.38	26.38	33.75	30.06	25.94	36.44	36.50	25.75	27.63	26.81	26.94	26.38	35.94	25.94	32.44	
1042	08:38:30	25.50	32.00	25.44	30.63	28.50	37.06	29.13	33.69	27.00	26.88	35.50	26.25	33.69	37.00	32.69	26.44	26.38	33.63	31.63	25.94	36.25	36.38	25.69	27.56	26.81	26.94	26.38	35.81	25.94	32.31	
1043	08:39:00	25.44	31.94	25.44	30.56	28.44	36.88	29.06	33.63	26.94	26.88	35.38	26.25	33.63	36.88	32.63	26.38	26.38	33.56	36.75	25.94	36.13	36.25	25.69	27.56	26.81	26.94	26.38	35.75	25.94	32.21	
1044	08:39:30	25.50	31.81	25.44	30.50	28.44	36.75	29.00	33.56	26.94	26.88	35.31	26.25	33.50	36.75	32.50	26.38	26.38	33.50	36.13	25.94	36.00	36.06	25.69	27.56	26.81	26.94	26.38	35.56	25.94	32.19	
1045	08:40:00	25.50	31.71	25.44	30.44	28.38	36.63	29.00	33.44	26.94	26.88	35.19	26.25	33.44	36.63	32.44	26.38	26.75	33.38	36.63	25.94	35.88	36.94	25.69	27.56	26.81	26.94	26.38	35.44	25.94	32.06	
1046	08:40:30	25.44	31.75	25.44	30.38	28.38	36.50	28.94	33.38	26.94	26.88	35.06	26.25	33.38	36.50	32.38	26.38	26.75	33.25	36.63	25.88	35.75	36.81	25.69	27.50	26.81						

serentnahme anhand der Temperaturänderungen nachvollzogen werden kann. Eine exakte Analyse und Überlagerung der erfassten Daten im Sinne einer Gleichzeitigkeitsbetrachtung wird in einem der späteren Abschnitte erläutert.

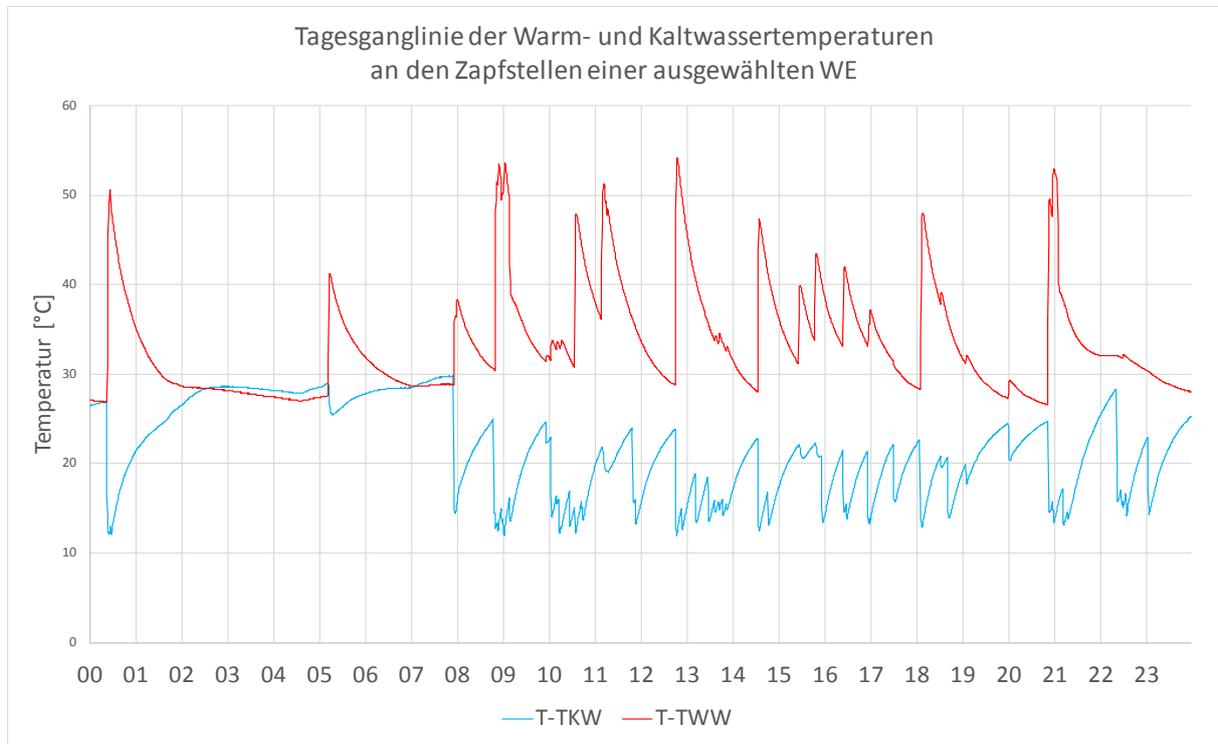


Abbildung 38 Beispiel: Tagesganglinie Trinkwassertemperaturen

1.4.3.3 Raumklimamonitoring

Die Erfassung der Raumklimadaten erfolgt in einem Zeitintervall von 60 Sekunden. Diese relativ hohe zeitliche Auflösung ist für die Untersuchung ausgewählter Einzelsituationen grundsätzlich sinnvoll. Bei der übersichtsweisen Betrachtung erweist sich jedoch eine Selektion der Daten in festzulegenden Zeitintervallen als praktikabel.

Zum Zweck der Datenselektion wurden Routinen konzipiert, die eine flexible Festlegung der Auswerteziträume und der Zeitintervalle ermöglichen. Diese Routinen erstellen eine Zielmatrix (vgl. hierzu auch Abbildung 37), in die die auszuwählenden Datensätze einsortiert werden. Die Datenverarbeitung in Matrixform ermöglicht eine vergleichsweise gute Performance bei der Datenselektion. Als Zeitintervall für die Selektion ist aus der Sicht der hygrothermischen Bauteilsimulation ebenso wie für die Gebäudesimulation und energetische Bilanzierungsaufgaben ein Stundenintervall durchaus geeignet, wobei prinzipiell auch kürzere Zeitintervalle zum Einsatz kommen können. Die Beurteilung der erfassten Datenmenge erfolgt analog zu den erfassten Kalt- und Warmwassertemperaturen matrixbasiert (vgl. 1.4.3.2). Das Ergebnis ist in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 13 Datenverfügbarkeit – Datenerfassung Raumklima Haus 1

WE-Nr.	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]
WE 01	1.052.429	99,98
WE 02	1.052.457	99,98
WE 03	1.052.475	99,98
WE 04	1.052.475	99,98
WE 05	1.046.531	99,42
WE 06	1.052.509	99,99
WE 07	1.052.490	99,99
WE 08	1.052.403	99,98
WE 09	1.052.500	99,99

Tabelle 14 Datenverfügbarkeit – Datenerfassung Raumklima Haus 2

WE-Nr.	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]
WE 01	914.568	86,88
WE 02	1.044.659	99,24
WE 03	954.080	90,64
WE 04	1.025.019	97,38
WE 05	953.388	90,57
WE 06	1.051.462	99,89
WE 07	1.051.504	99,89
WE 08	1.051.143	99,86
WE 09	1.051.238	99,87
WE 10	1.024.600	97,34

Tabelle 15 Datenverfügbarkeit – Datenerfassung Raumklima Haus 3

WE-Nr.	Anzahl Datensätze	Verfügbarkeit [%]
WE 01	1.051.387	99,88
WE 02	1.051.387	99,88
WE 03	1.051.539	99,90
WE 04	1.051.575	99,90
WE 05	1.051.524	99,89
WE 06	1.051.533	99,89
WE 07	1.051.592	99,90
WE 08	1.051.580	99,90 </td
WE 09	1.051.587	99,90

Die geringere Datenverfügbarkeit in Haus 2, WE 1, 3 und 5 liegt in Anpassungen an den WE-Controllern begründet, welche sich zu Beginn der Messungen teils noch bis in das erste Quartal 2016 hinzogen. Für das komplette Jahr 2017 konnte eine ebenso gute Datenlage wie in den anderen WE festgestellt werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft den Verlauf der Raumtemperatur und der relativen Raumluftfeuchte in zwei ausgewählten Räumen aus Haus 1. Durch die Zusammenfassung der Daten zu Stundenmittelwerten wird die Darstellung als Übersicht besser lesbar. Deutlich zu erkennen ist, dass sich die Temperaturen in den beiden Räumen stark unterscheiden. Der Nutzer hat demnach für die Temperierung der Räume unterschiedliche Zielvorstellungen.

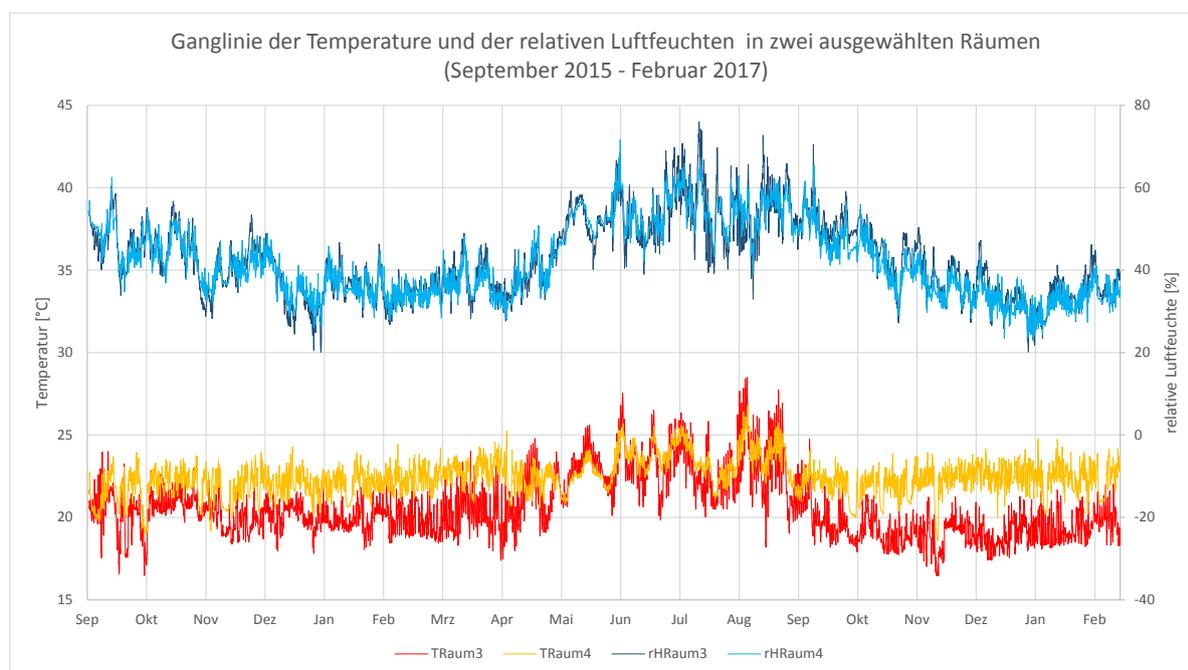


Abbildung 39 Beispiel für die Darstellung der Raumklimata in zwei ausgewählten Räumen

Ein vollständiger Überblick über die erfassten Raumklimazustände ist im vertraulichen Teil des Anhangs enthalten. Auf der Grundlage der selektierten Stundenwerte erfolgte ergänzend eine manuelle Plausibilisierung aller erfassten Raumklimadaten. Bei fehlenden Einzelwerten (bis zu max. 5 Stunden) erfolgte die Ergänzung der fehlenden Daten durch lineare Interpolation. In wenigen Fällen fehlten Daten über einen oder mehrere Tage. Diese wurden im Sommerfall ersetzt durch Daten unmittelbar benachbarter Räume / WE mit gleichem Schnitt und gleicher Fassadenausrichtung, da auf diese Weise der Außenklimateinfluss vergleichsweise gut abgebildet werden kann. Im Winterfall bietet sich als alternative Lösungsvariante der Ersatz der Daten durch Messwerte aus vorangegangenen Tagen bzw. aus dem Vergleichszeitraum des Vor- oder Folgejahres an, da so das individuelle Nutzerverhalten (Wärmebedarf / Lüftungsverhalten) am besten nachempfunden wird. Im Ergebnis werden validierte Daten im Stundenraster in einem offenen Format (CSV) für andere Anwendungen und Projekte bereitgestellt.

Ein wichtiger Auswertungsteil wird sich mit der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Außenklima und Innenklima befassen. Ziel ist es, einen Ansatz für die Ermittlung des Innenklimas unter Berücksichtigung der außenseitig herrschenden Klimarandbedingungen der inneren Feuchtelasten sowie der Zieltemperaturen im Gebäude bzw. im Raum zu finden und damit einen Beitrag zur Diskussion um die anzusetzenden raumseitigen Randbedingungen für Nachweisverfahren zu leisten.

Darüber hinaus liegen mit den erfassten Raumklimadaten zeitlich gut aufgelöste Randbedingungen für die instationäre hygrothermische Simulation der bauphysikalischen Zustände und Abläufe innerhalb der Baukonstruktion sowie für die energetische Gebäudesimulation vor. Anhand der erfassten Vergleichsdaten können unterschiedliche Simulationstools und Bilanzierungsverfahren verglichen und bewertet werden.

1.4.3.4 Monitoring Fensteröffnungsstatus

Bei der Erfassung des Fensteröffnungsstatus in den WE wurde kein starres Zeitraster für die Ablage der Daten verwendet. Es wurde jeweils mit einem Zeitstempel protokolliert, welche konkrete Zustandsänderung eingetreten ist. Diese Art der Erfassung wirkt sich positiv hinsichtlich der zu verarbeitenden Datenmenge aus. Sie ermöglicht jedoch nicht die Vollständigkeitsprüfung nach den bisher beschriebenen Verfahren. Im Rahmen der Datenauswertung wird daher eine manuelle Plausibilisierung erforderlich. Im Ergebnis werden die täglichen Öffnungshäufigkeiten (Fensteröffnungsminuten) ausgewertet und beschrieben.

1.4.3.5 Bauteilmonitoring

Eine wesentliche Komponente des Bauteilmonitoring (BTM) ist die Erfassung der unmittelbar vor der jeweiligen Fassade herrschenden Außenluftkonditionen. Diese unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Fassadenausrichtung unter Umständen erheblich von den am Standort herrschenden meteorologisch ermittelten Temperaturen und relativen Luftfeuchten. Im Rahmen des durchgeführten BTM wurden aus diesem Grund die Außenlufttemperaturen und die dazu gehörigen relativen Luftfeuchten, sowohl vor einer Nordfassade (Haus 1) als auch vor einer Südfassade (Haus 3), erfasst. Im Ergebnis der Ermittlung der Temperaturdifferenzen

beider Messungen erweist es sich als zulässig, einzelne fehlende Werte von der jeweils anderen Messstelle zu übernehmen. Dies war in weniger als 0,3 % der erfassten Werte notwendig. Demnach stehen die Außenklimakonditionen für beide Fassadenausrichtungen zu Simulationszwecken (Bauteil- und Gebäudesimulation) im Stundenraster mit einer hohen Datenqualität zur Verfügung. Die nachfolgenden Grafiken geben anhand der Nordfassade einen Überblick über die erfassten Messwerte.

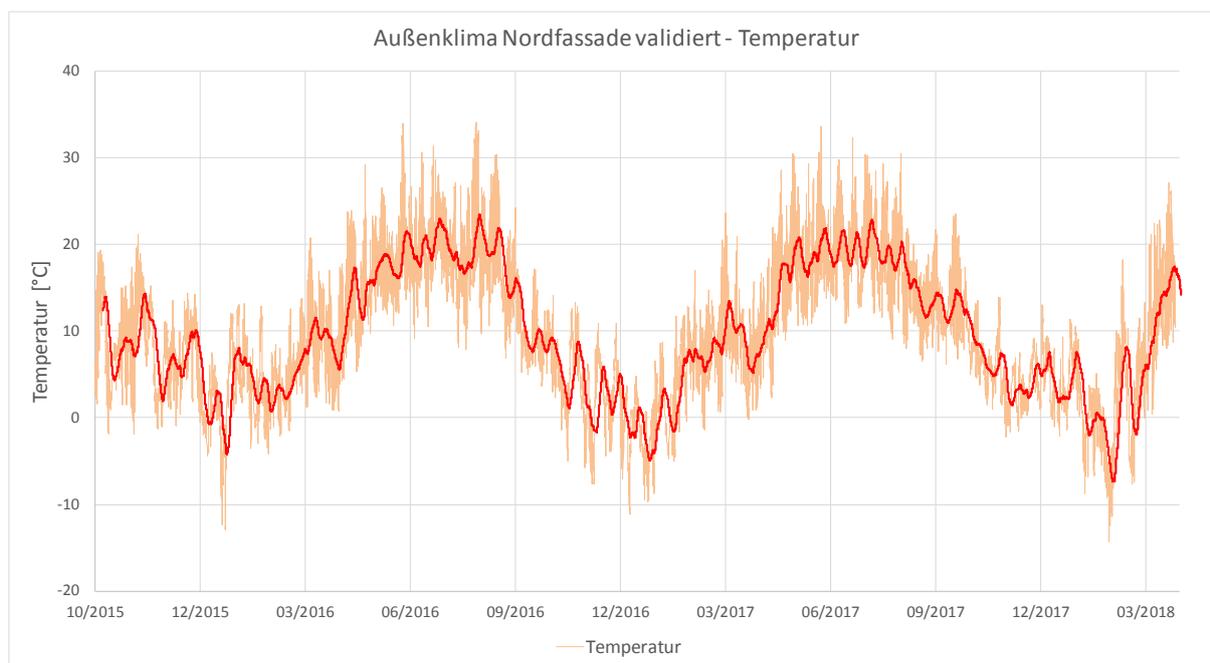


Abbildung 40 Erfasste Temperaturen im Bereich der Nordfassade

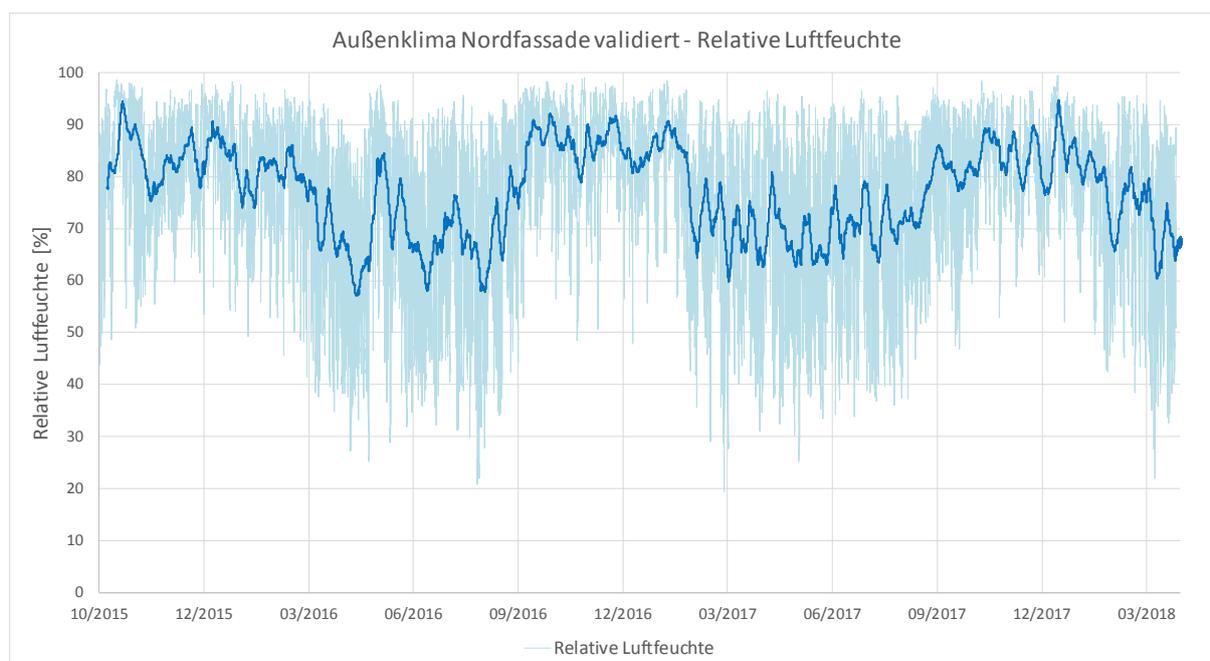


Abbildung 41 Relative Luftfeuchten im Bereich der Nordfassade

Zur besseren Lesbarkeit der Darstellungen werden die konkreten Einzelwerte in einer helleren Farbabstufung dargestellt, da diese bedingt durch die tageszeitlichen Schwankungen nur schwierig interpretiert werden können. Die jeweils dunklere Linie verdeutlicht den Jahresgang auf der Basis eines fortlaufend gebildeten Mittelwertes über einen Zeitraum von 168 Stunden (eine Woche). Diese Art der Aufbereitung wird im Rahmen der Dokumentation auch für alle weiteren dafür relevanten grafischen Darstellungen aus dem Bereich des BTM übernommen. Insbesondere bei der Betrachtung der relativen Luftfeuchten darf der Zusammenhang mit der korrespondierenden Temperatur nicht außer Acht gelassen werden. Die Darstellung wird daher um die absoluten Wassergehalte (Taupunkttemperaturen) der Außenluft ergänzt.

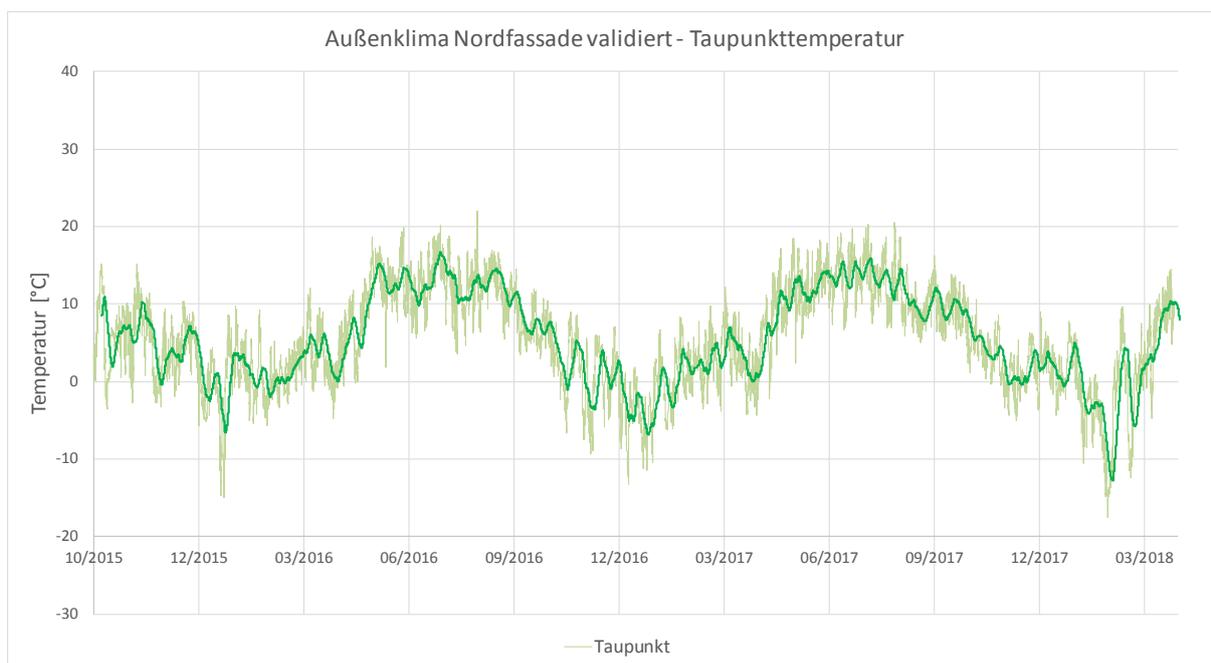
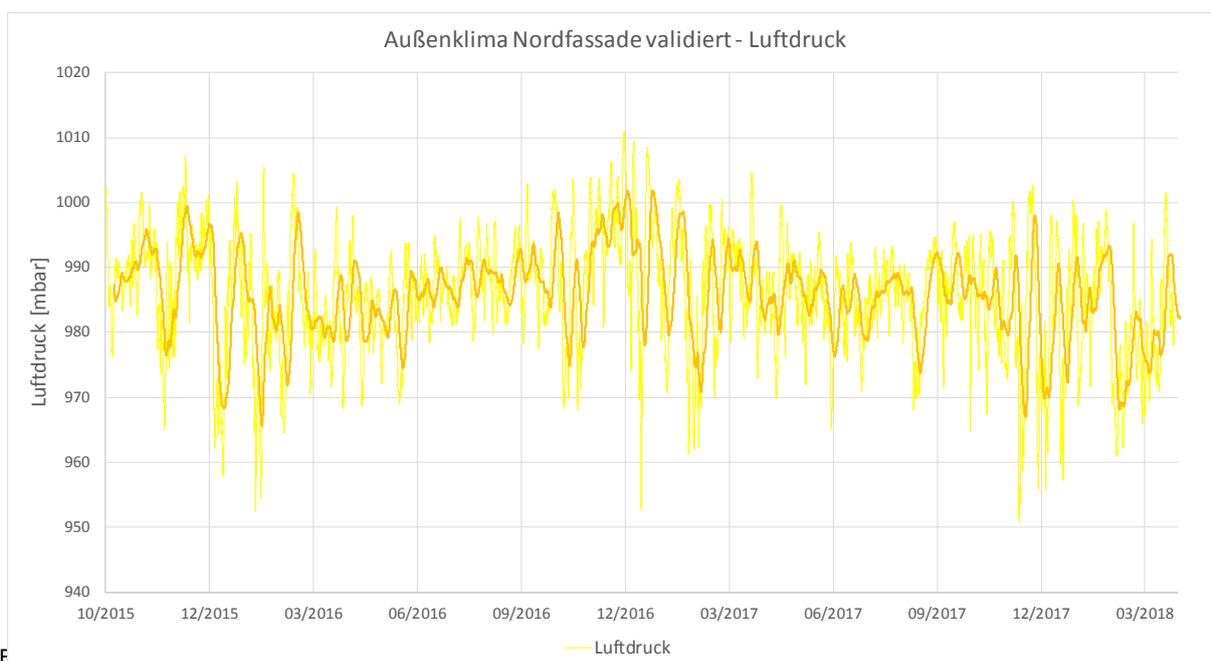


Abbildung 42 Taupunkttemperaturen im Bereich der Nordfassade



E

Abbildung 43 Gemessener Luftdruck im Bereich der Nordfassade

Der jeweils herrschende Luftdruck wurde ebenso aufgezeichnet. Er unterliegt weniger deutlich jahreszeitlichen Schwankungen. Dennoch wird deutlich, dass die kurzzeitigen Amplituden in den Wintermonaten ausgeprägter sind als in den Sommermonaten.

Neben den inneren Randbedingungen, welche im Rahmen des Raumklimamonitoring bereitgestellt werden und den erfassten Außenklimabedingungen, werden im Rahmen des Bauteilmonitoring ausgewählte Messgrößen an und innerhalb der Konstruktion erfasst. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft den Aufbau einer Bauteilmessstrecke.

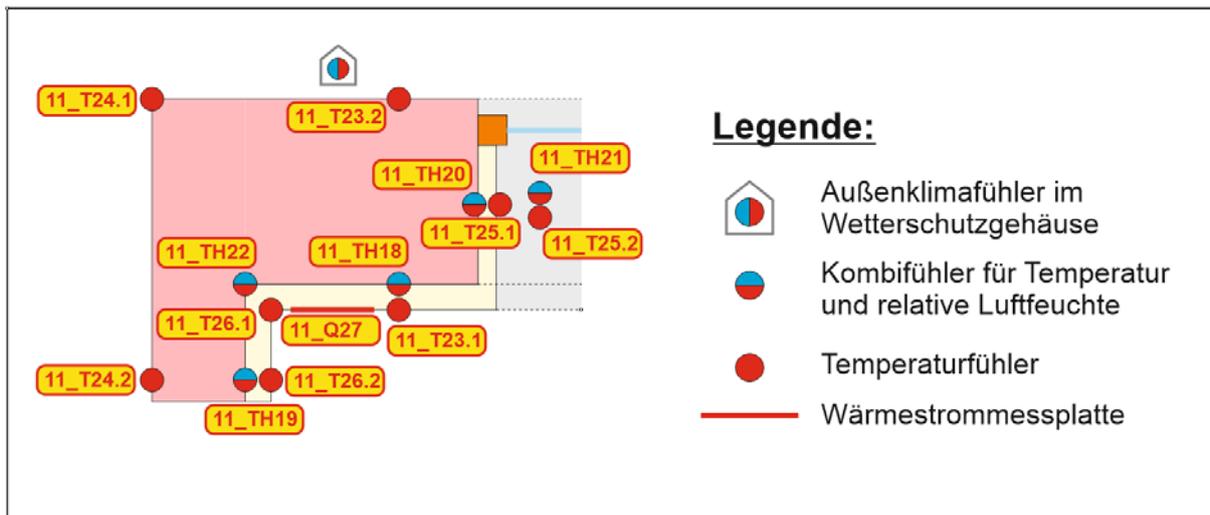


Abbildung 44 Prinzipskizze einer Bauteilmessstrecke

Zur Veranschaulichung werden in den nachfolgenden Grafiken beispielhaft ausgewählte Daten einer Messstrecke visualisiert. Eine vollständige grafische Zusammenstellung aller erfassten Größen befindet sich in der Anlage.

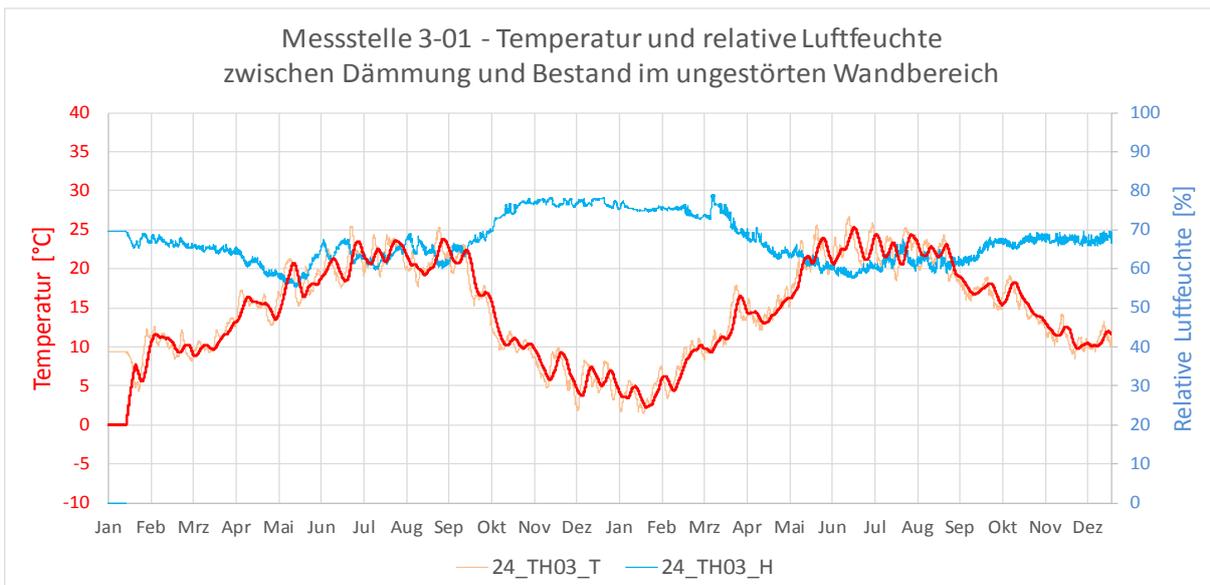


Abbildung 45 Messwerte im Bereich der ungestörten Wand

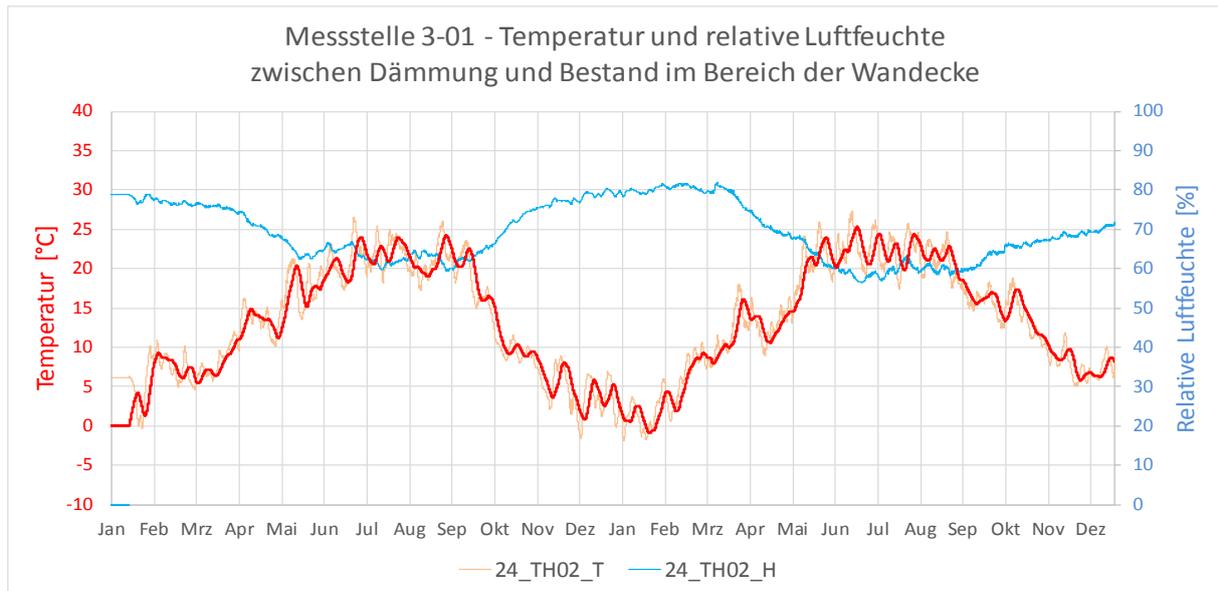


Abbildung 46 Messwerte im Bereich der Wandecke

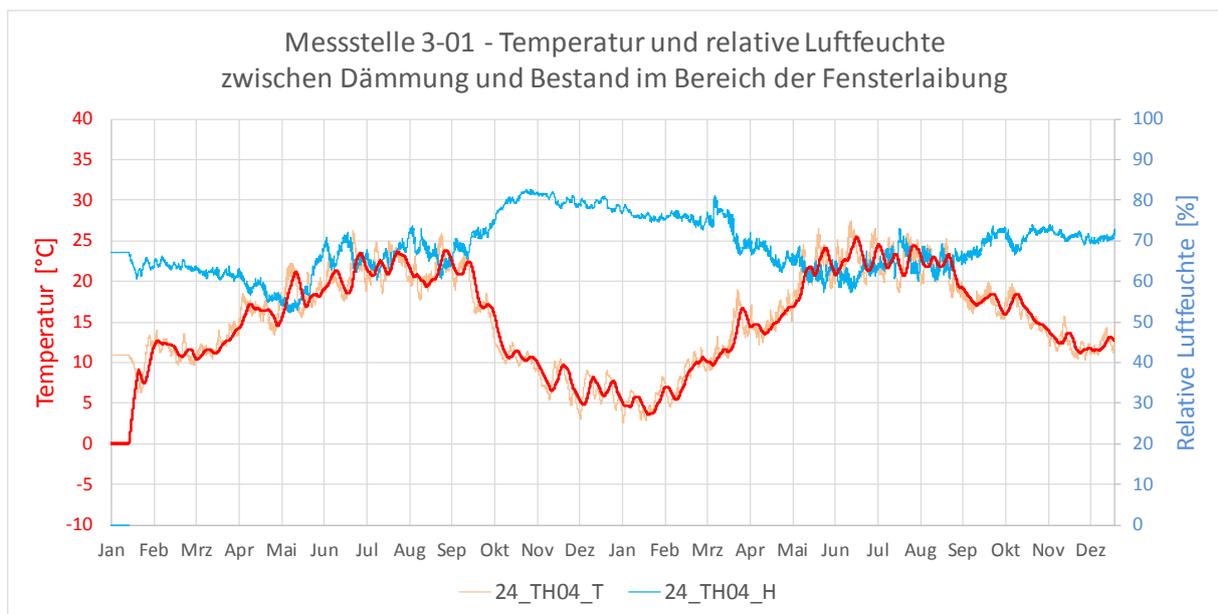


Abbildung 47 Messwerte im Bereich der Fensterlaibung

Die Messwertverläufe der Sensoren zwischen Bestandsmauerwerk und Innendämmung in den ungestörten Wandbereichen, den Außenwandecken und den Fensterlaibungen sowie – stürzen verlaufen prinzipiell ähnlich. Die Temperaturen im Bereich der Außenwandecken fallen dabei etwas niedriger aus, was auf die Wirkung der geometrischen Wärmebrücke zurückgeführt werden kann. In allen Fällen kann festgestellt werden, dass die im Zuge des Winterhalbjahres kumulierten Feuchtemengen jeweils während des darauffolgenden Sommerhalbjahres wieder austrocknen, so dass es zu keinem Auffeuchten der Konstruktion über mehrere Jahre kommen wird.

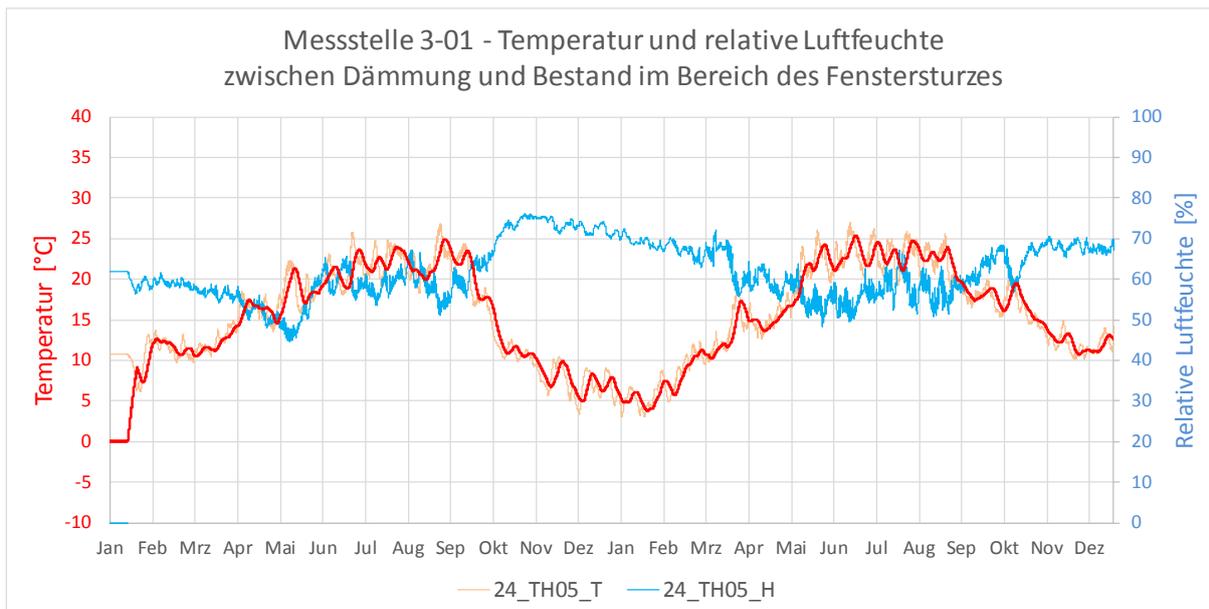


Abbildung 48 Messwerte im Bereich des Fenstersturzes

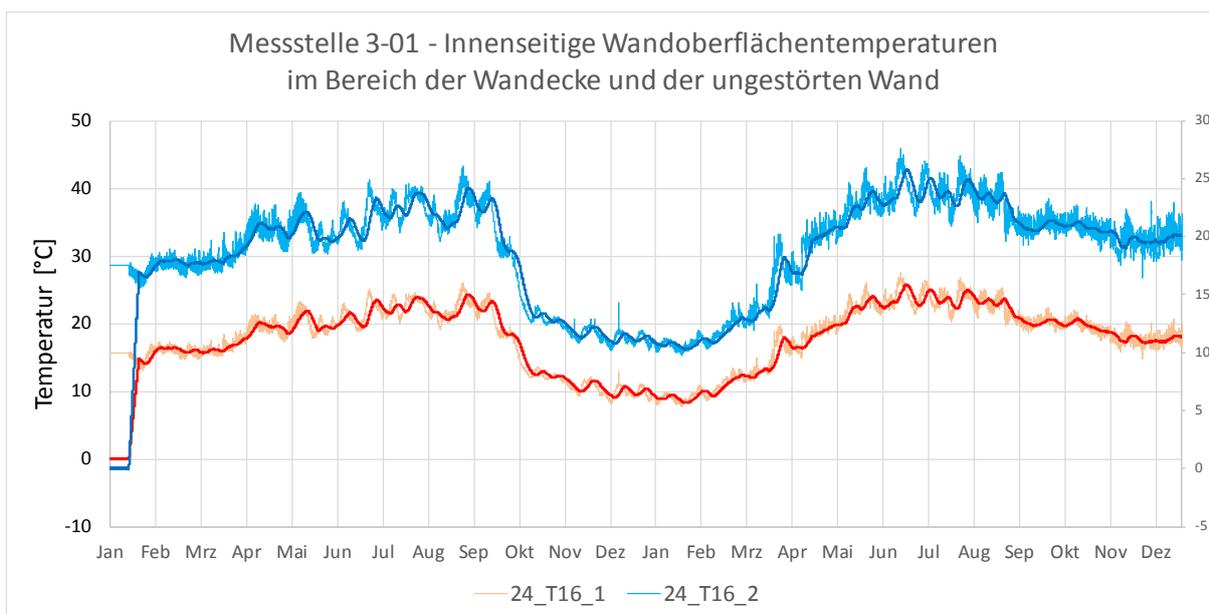


Abbildung 49 Vergleich der Oberflächentemperaturen auf den raumseitigen Wandoberflächen

Aus Abbildung 49 wird der Einfluss der Wärmebrückenwirkung in der Gebäudeecke auf die Temperaturverhältnisse ebenfalls deutlich. Das Absinken der Oberflächentemperatur in der Raumecke auf unter 12,3 °C ist an dieser Stelle damit zu begründen, dass die WE im Winter 2016/2017 nicht bewohnt war und demnach die Raumheizung auf ein Minimum gedrosselt wurde. Da jedoch ebenfalls keine Feuchtelasten anfielen, kann diese Situation als unkritisch bewertet werden (vgl. dazu auch Abbildung 46). Diese Aussage ist auch für die nachfolgende Darstellung der Temperaturen im Bereich der Fensterlaibung gültig.

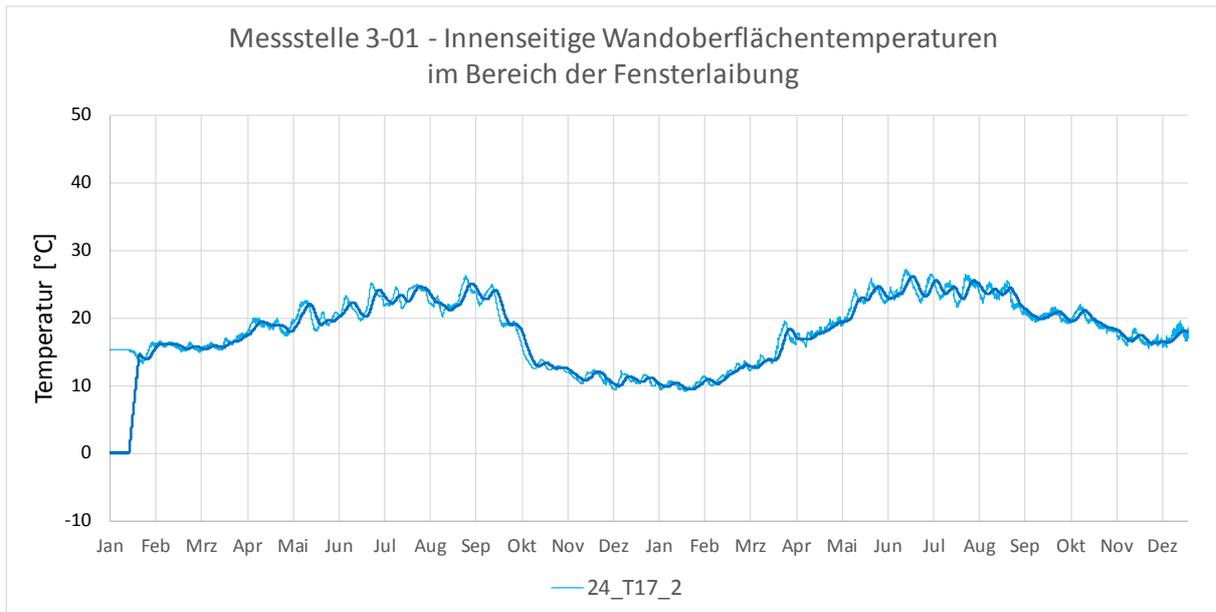


Abbildung 50 Oberflächentemperaturen auf der Fensterlaibung

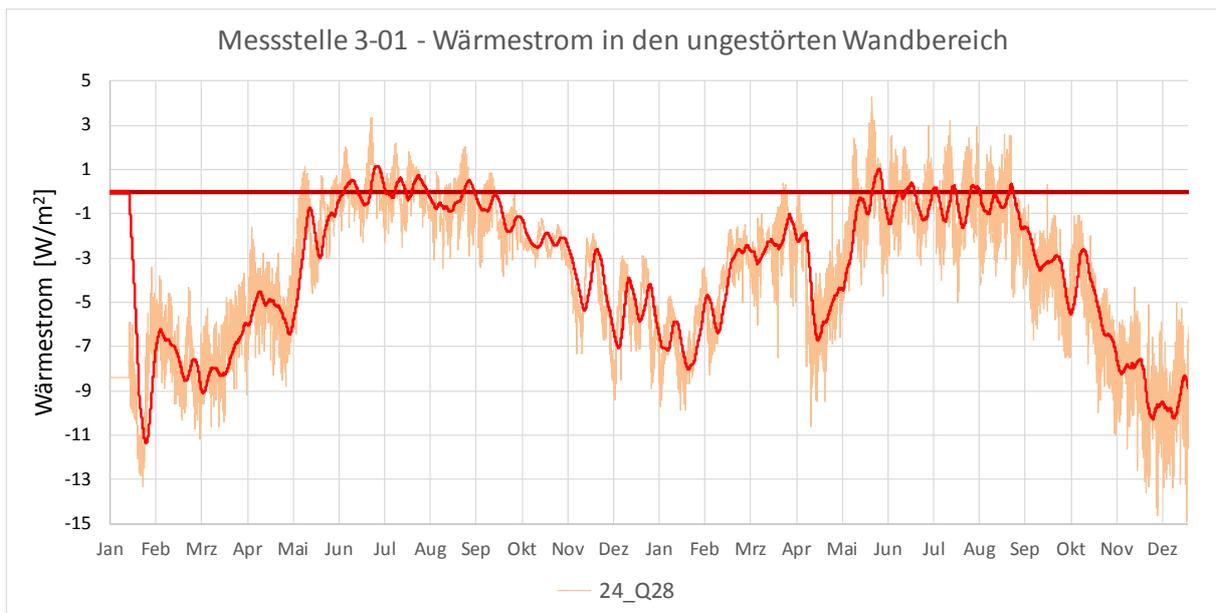


Abbildung 51 Wärmestrom vom Raum in die Außenwandkonstruktion

Bei der Betrachtung des Wärmestroms vom Raum in die Außenwandkonstruktion ist zu beachten, dass es sich um den Wärmedurchgang durch ein direkt an der Innenwandoberfläche angebrachtes Sensorelement handelt. Es wird demnach der **Wärmeeintrag in die Konstruktion** und nicht der **Wärmedurchgang durch die Konstruktion** gemessen.

1.4.4 Datenauswertung / Datenanalyse

1.4.4.1 Raumklimaanalyse

Ein wichtiger Beitrag des Projektes liegt in der Funktion als „Datenlieferant“ für Berechnungstools. Darüber hinaus soll aber auch eine Analyse und Diskussion der Messdaten zur Validierung der standard-konformen Randbedingungen für das Innenraumklima zur Bewertung von konstruktiven Details erfolgen. Im folgenden Abschnitt wird ein Vergleich der Messwerte mit den Ansätzen der DIN EN 15026, Anhang C beschrieben.

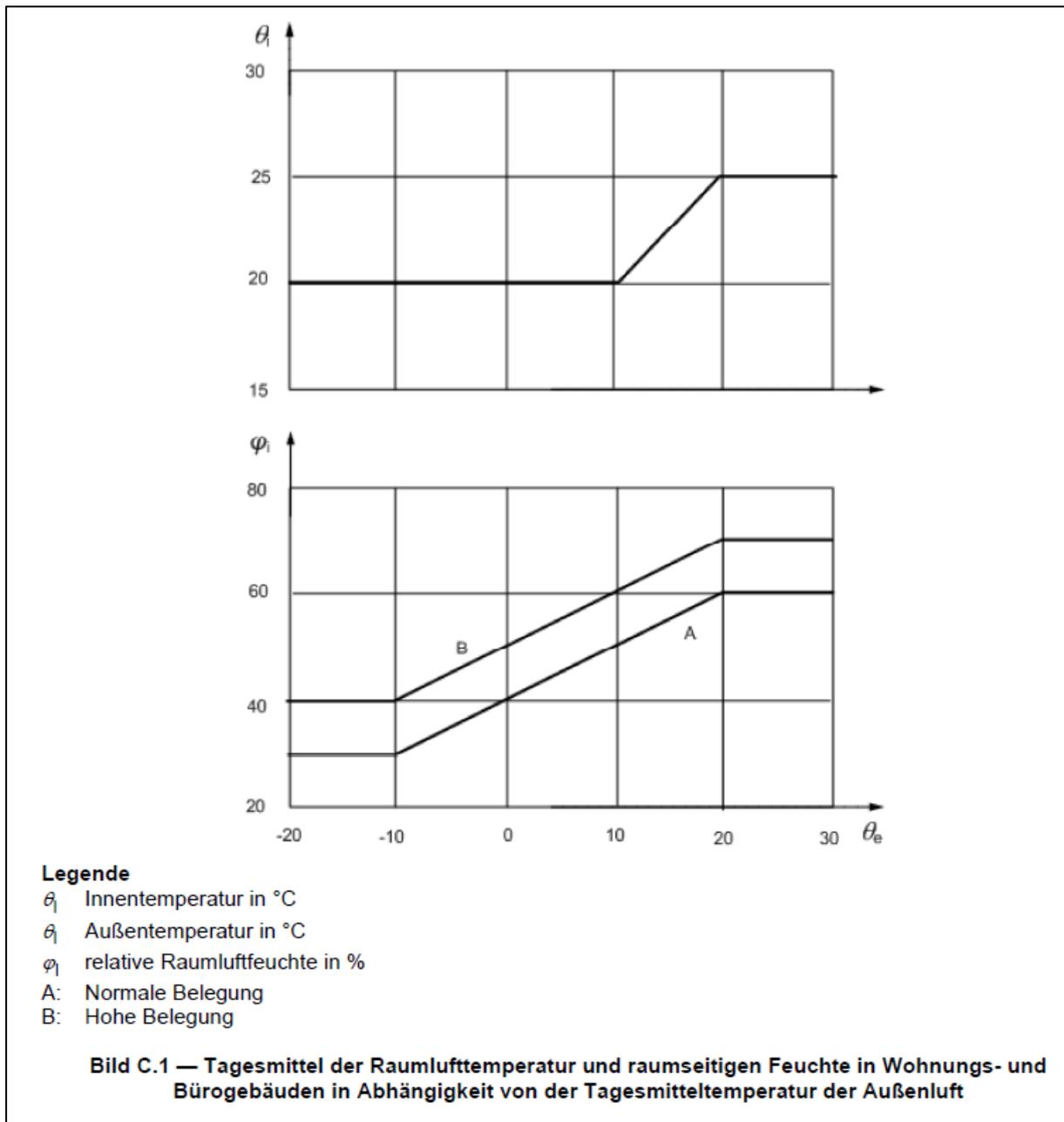


Abbildung 52 Auszug aus der DIN EN 15026, Anhang C – Raumseitige Randbedingungen

Gemäß den DIN-Ansätzen werden die raumseitigen Temperaturen und relativen Luftfeuchten anhand der jeweils herrschenden Außenlufttemperatur ermittelt. Der Ansatz berücksichtigt die Infiltration, und Lüftung, den Wassergehalt in der Außenluft sowie die Feuchtelasten im Raum. Berechnet man aus diesen Daten den absoluten Wassergehalt in der Raumluft, so erhält man jeweils eine Kurve für den oberen und den unteren Eckwert gemäß Abbildung 53.

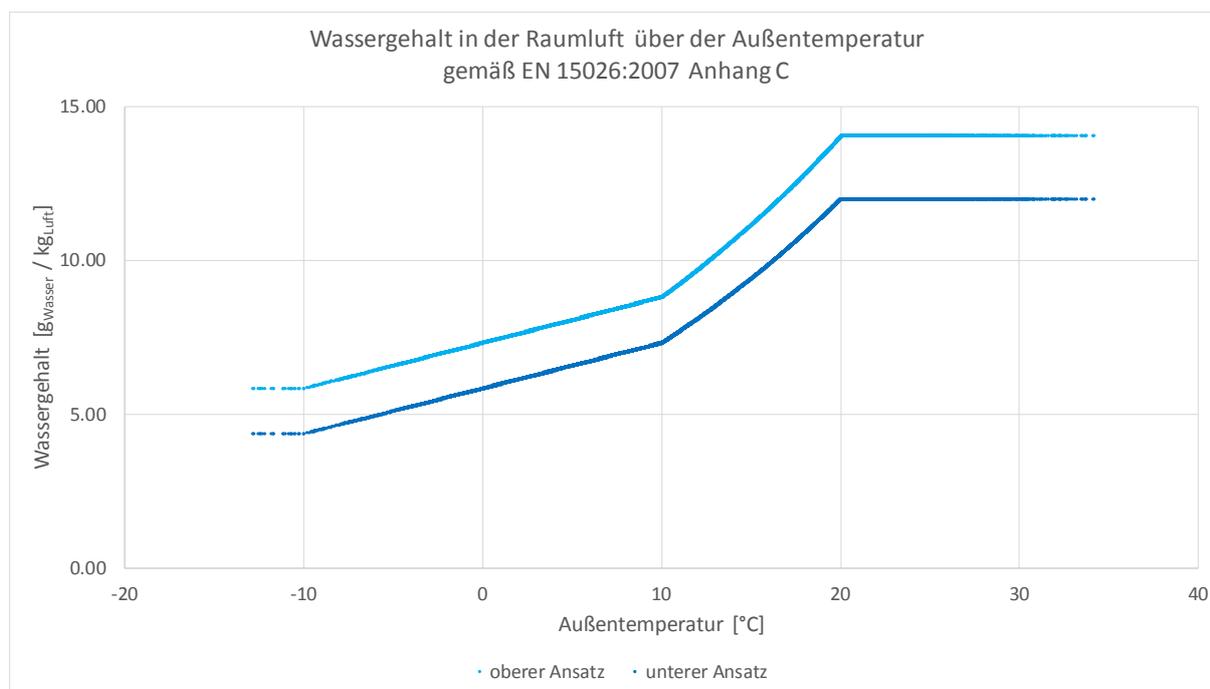


Abbildung 53 Absoluter Wassergehalt in der Raumluft über der Außenlufttemperatur

Zur Bewertung der gemessenen Raumluftfeuchten im Projekt, wurden die Messdaten aller erfassten Raumklimadatenätze entsprechend aufbereitet und in die Darstellung zunächst als Punktwolke geplottet. Ein entsprechendes Beispiel enthält Abbildung 54. Bereits anhand dieser Darstellung ist zu vermuten, dass unter den hier gegebenen Umständen, insbesondere unter extremen äußeren Randbedingungen (besonders niedrige oder besonders hohe Temperaturen), zu hohe Feuchtelasten unterstellt werden.

Um dieser Annahme qualifizierter nachzugehen, wurden in einem nächsten Schritt Mittelwerte gebildet. Das bedeutet, für jede verfügbare Außentemperatur wurde für jede der verfügbaren Messreihen (also für jeden Raum) ein mittlerer Wassergehalt über die gesamte Projektlaufzeit gebildet. Eine Differenzierung nach Sommer-/und Winterfall ist an dieser Stelle nicht notwendig, sie ergibt sich ohnehin anhand der Außentemperatur.

Die Ergebnisse der Mittelwertbildung sind in der nachfolgenden Abbildung 54 grafisch aufgetragen. Die grauen Kurven zeigen den mittleren Wassergehalt in der Raumluft. Als Vergleichsgrößen stellen die gestrichelten Linien wiederum den DIN-Ansatz dar. Es ist erkennbar, dass der Ansatz gemäß DIN – Randbedingung A „Normale Belegung“ bei Außentemperaturen unter 15 °C die tatsächlichen Verhältnisse recht gut abbildet. Bei höheren Temperaturen liegen die gemessenen Wassergehalte jedoch deutlich unter den DIN Randbedingungen. Die Kurve für die DIN-Randbedingung B – „Hohe Belegung“ liegt für den hier vorliegen-

den Fall deutlich zu hoch, kann aber auf Grund der Kenntnisse zur Belegung der WE auch nicht zum Ansatz kommen. Die durchgezogene blaue Linie zeigt den Wassergehalt in der Außenluft (ermittelt anhand des vor Ort gemessenen Außenklimas). Als Differenz aus der Wassermenge in der Außenluft und in der Raumluft kann ferner die im vorliegenden Fall eingetragene Feuchtelast raumkonkret ermittelt werden. Eine entsprechende Darstellung befindet sich in Abbildung 56.

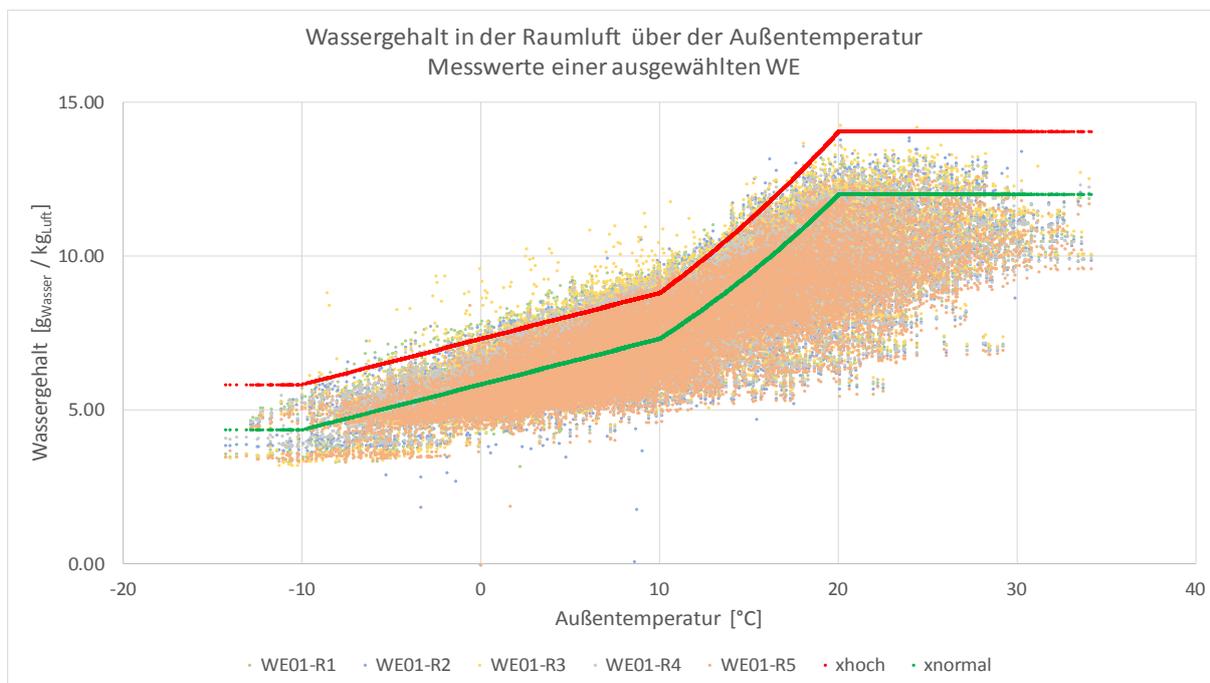


Abbildung 54 Wassergehalt in der Raumluft über der Außenlufttemperatur - Einzelwerte

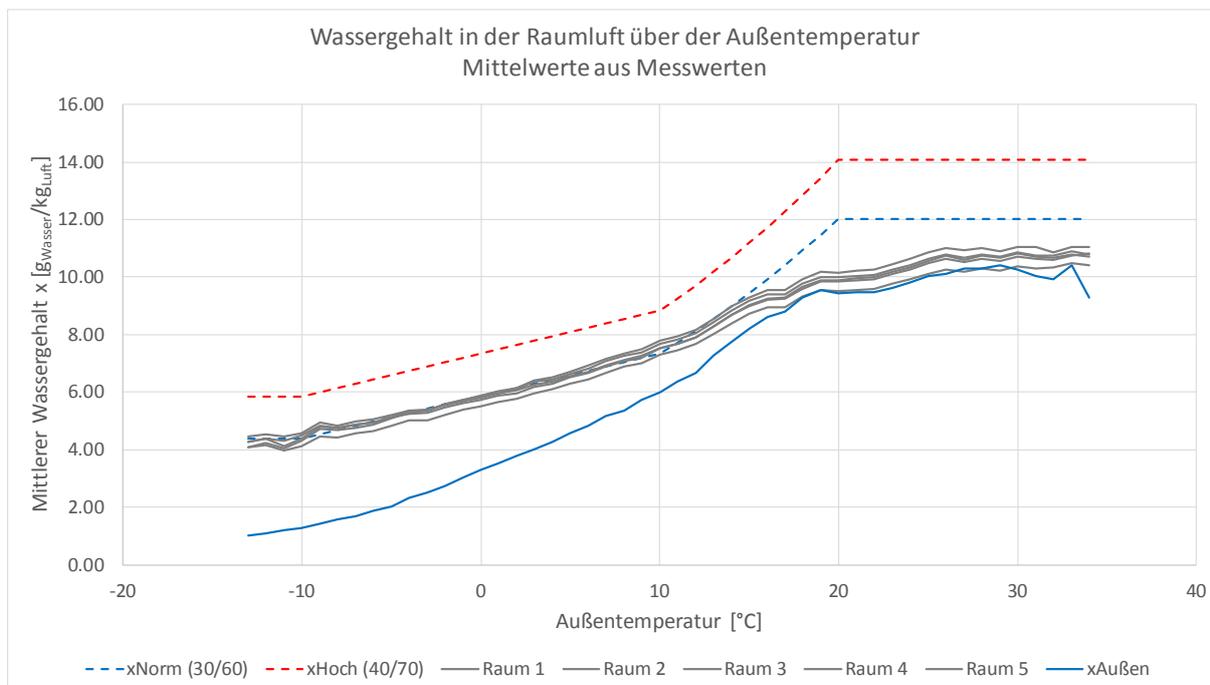


Abbildung 55 Mittlere Wassergehalte in der Raumluft über der Außenluft – Beispiel

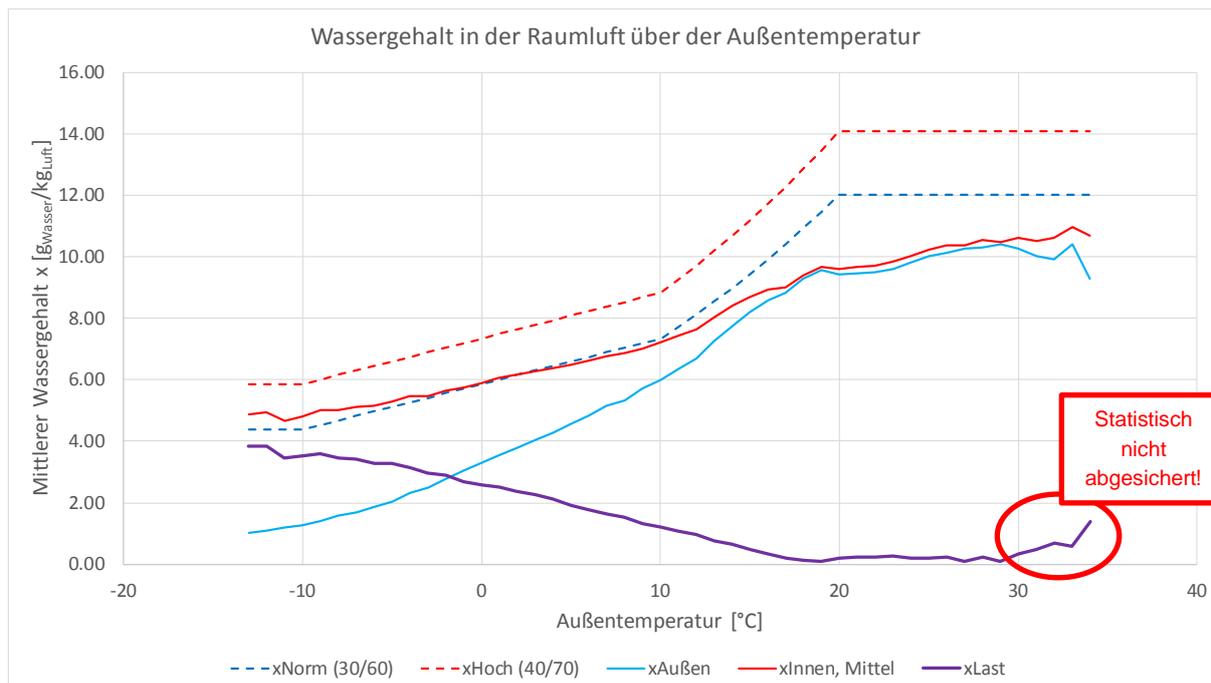


Abbildung 56 Feuchtelast als Resultat von Feuchteeintrag und Austausch mit der Außenluft

Es wird deutlich, dass ab einer Außentemperatur von ca. 17 °C die durch die Nutzer eingebrachte Feuchtelast nahezu vollständig durch die Lüftung kompensiert wird. Die Konstruktion wird demnach bei warmen Außentemperaturen besser entlastet als es gemäß DIN-Randbedingung möglich ist. Für eine stationäre Berechnung des Mindestwärmeschutzes oder zum Feuchteschutz stellt dies selbstverständlich kein Problem dar.

Eine instationäre Bauteilsimulation hingegen unterstellt bei Anwendung des DIN-Ansatzes in den wärmeren Monaten regelmäßig zu hohe Raumluftfeuchten. Das bedeutet, dass die Konstruktion während der Sommerperiode stärker aufweicht als dies unter realen Bedingungen der Fall sein würde. Somit ergibt sich auch eine höhere Bauteilfeuchte zu Beginn der kühleren Periode. Daraus resultiert wiederum eine erhöhte Kondensatgefährdung und eine ungünstige Bewertung konstruktiver Details.

Im konkreten Fall muss der Tatsache Beachtung geschenkt werden, dass in allen Fällen mechanische Lüftungsanlagen implementiert wurden (Lüftungsgeräte in den WE bzw. zentrale Abluftanlagen für das jeweilige Gebäude). Eine vergleichbare Aussage für Gebäude ohne mechanische Lüftung müsste demnach noch getroffen werden – auf diesem Gebiet besteht somit weiterer Forschungsbedarf.

Für die Bauteilsimulation im Rahmen von Sanierungsvorhaben, bei denen Lüftungsanlagen vorgesehen werden, scheint der Ansatz gemäß DIN 15026 zumindest für den Sommerfall ungeeignet.

Einen vollständigen Überblick über die Bewertung aller gemessenen Räume ist im vertraulichen Teil der Anlage enthalten.

1.4.4.2 Betrachtung des Wärmeverbrauchs im Kontext zur Wohnfläche

Die nachfolgenden Übersichten zeigen die durch die Wärmemengenmesser erfassten Wärmeverbrauchswerte auf Monatsbasis für das Jahr 2017.

Haus 1									
Zählerstände									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.01.2017	13,088	17,791	11,392	10,207	13,270	10,852	5,612	7,080	8,299
01.02.2017	14,324	19,375	12,575	10,840	14,753	11,858	6,205	8,043	9,113
01.03.2017	15,187	20,429	13,407	11,294	15,767	12,585	6,537	8,526	9,624
01.04.2017	15,787	21,042	14,033	11,627	16,522	13,210	6,743	8,884	9,943
01.05.2017	16,252	21,425	14,562	11,997	17,088	13,777	6,840	9,059	10,193
01.06.2017	16,407	21,696	14,835	12,149	17,300	14,076	6,867	9,100	10,260
01.07.2017	16,426	21,773	14,911	12,162	17,402	14,156	6,882	9,134	10,281
01.08.2017	16,455	21,837	14,984	12,172	17,488	14,198	6,897	9,137	10,302
01.09.2017	16,483	21,912	15,027	12,180	17,553	14,219	6,911	9,166	10,321
01.10.2017	16,604	22,036	15,169	12,232	17,682	14,295	6,938	9,212	10,397
01.11.2017	16,934	22,326	15,397	12,367	18,004	14,397	7,101	9,326	10,683
01.12.2017	17,644	23,012	15,961	12,770	18,957	14,596	7,423	9,767	11,273
01.01.2018	18,527	23,999	16,806	13,315	20,146	14,845	7,839	10,324	12,008

Monatsverbrauch [kWh/Monat]									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jan 17	1,236	1,584	1,183	633	1,483	1,006	593	963	814
Feb 17	863	1,054	832	454	1,014	727	332	483	511
Mrz 17	600	613	626	333	755	625	206	358	319
Apr 17	465	383	529	370	566	567	97	175	250
Mai 17	155	271	273	152	212	299	27	41	67
Jun 17	19	77	76	13	102	80	15	34	21
Jul 17	29	64	73	10	86	42	15	3	21
Aug 17	28	75	43	8	65	21	14	29	19
Sep 17	121	124	142	52	129	76	27	46	76
Okt 17	330	290	228	135	322	102	163	114	286
Nov 17	710	686	564	403	953	199	322	441	590
Dez 17	883	987	845	545	1,189	249	416	557	735

Bezugsgrößen									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
WFL [m ²]	69.14	80.66	64.78	65.76	100.96	50.14	52.98	82.17	50.14

Monatsverbrauch [kWh/m ² Monat]									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jan 17	18	20	18	10	15	20	11	12	16
Feb 17	12	13	13	7	10	14	6	6	10
Mrz 17	9	8	10	5	7	12	4	4	6
Apr 17	7	5	8	6	6	11	2	2	5
Mai 17	2	3	4	2	2	6	1	0	1
Jun 17	0	1	1	0	1	2	0	0	0
Jul 17	0	1	1	0	1	1	0	0	0
Aug 17	0	1	1	0	1	0	0	0	0
Sep 17	2	2	2	1	1	2	1	1	2
Okt 17	5	4	4	2	3	2	3	1	6
Nov 17	10	9	9	6	9	4	6	5	12
Dez 17	13	12	13	8	12	5	8	7	15

Abbildung 57 Wärmeverbrauch 2017 monatlich bezogen auf die Grundfläche – Haus 1

Bei der Betrachtung der Wärmebedarfswerte für Haus 1 ist zu beachten, dass hier auch der Wärmeanteil zur dezentralen Bereitung des Trinkwarmwassers enthalten ist. Ein direkter Vergleich ist daher nur zwischen den WE in Haus 2 und 3 möglich.

Haus 2										
Zählerstände										
	WE									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
01.01.2017	11,195	6,415	7,392	4,836	4,337	13,335	5,043	13,456	5,565	8,880
01.02.2017	12,590	7,059	8,207	5,323	4,930	14,495	5,661	14,699	6,236	9,782
01.03.2017	13,554	7,515	8,728	5,640	5,227	15,325	6,018	15,479	6,581	10,493
01.04.2017	14,344	7,515	9,081	5,815	5,422	15,967	6,224	16,150	6,801	11,039
01.05.2017	14,956	7,658	9,336	5,933	5,455	16,594	6,363	16,598	7,099	11,465
01.06.2017	15,255	7,702	9,404	5,944	5,482	16,825	6,403	16,758	7,240	11,612
01.07.2017	15,337	7,702	9,412	5,944	5,482	16,826	6,403	16,767	7,291	11,651
01.08.2017	15,380	7,702	9,417	5,944	5,482	16,826	6,403	16,770	7,338	11,682
01.09.2017	15,401	7,702	9,417	5,944	5,482	16,826	6,403	16,771	7,376	11,708
01.10.2017	15,698	7,702	9,464	5,967	5,486	16,918	6,403	16,861	7,468	11,876
01.11.2017	16,132	7,702	9,613	6,016	5,530	17,262	6,467	17,160	7,653	12,211
01.12.2017	16,689	7,702	9,984	6,195	5,871	18,070	6,731	18,017	8,056	12,775
01.01.2018	17,699	7,834	10,710	6,490	6,440	19,130	7,084	18,931	8,565	13,514
Monatsverbrauch [kWh/Monat]										
	WE									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Jan 17	1,395	644	815	487	593	1,160	618	1,243	671	902
Feb 17	964	456	521	317	297	830	357	780	345	711
Mrz 17	790	0	353	175	195	642	206	671	220	546
Apr 17	612	143	255	118	33	627	139	448	298	426
Mai 17	299	44	68	11	27	231	40	160	141	147
Jun 17	82	0	8	0	0	1	0	9	51	39
Jul 17	43	0	5	0	0	0	0	3	47	31
Aug 17	21	0	0	0	0	0	0	1	38	26
Sep 17	297	0	47	23	4	92	0	90	92	168
Okt 17	434	0	149	49	44	344	64	299	185	335
Nov 17	557	0	371	179	341	808	264	857	403	564
Dez 17	1,010	132	726	295	569	1,060	353	914	509	739
Bezugsgrößen										
	WE									
WFL [m ²]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	41.29	44.43	47.15	41.32	44.43	47.19	40.93	90.35	72.58	65.66
Monatsverbrauch [kWh/m ² Monat]										
	WE									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9
Jan 17	34	14	17	12	13	25	15	14	9	14
Feb 17	23	10	11	8	7	18	9	9	5	11
Mrz 17	19	0	7	4	4	14	5	7	3	8
Apr 17	15	3	5	3	1	13	3	5	4	6
Mai 17	7	1	1	0	1	5	1	2	2	2
Jun 17	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Jul 17	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Aug 17	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Sep 17	7	0	1	1	0	2	0	1	1	3
Okt 17	11	0	3	1	1	7	2	3	3	5
Nov 17	13	0	8	4	8	17	6	9	6	9
Dez 17	24	3	15	7	13	22	9	10	7	11

Abbildung 58 Wärmeverbrauch 2017 monatlich bezogen auf die Grundfläche – Haus 2

Haus 3									
Zählerstände									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.01.2017	4,004	4,447	3,156	3,710	2,352	3,132	3,494	2,824	3,344
01.02.2017	4,162	4,863	3,677	4,597	3,032	3,419	4,879	3,299	4,438
01.03.2017	5,190	5,123	4,046	5,661	3,269	3,932	5,649	3,583	5,432
01.04.2017	5,738	5,142	4,461	6,479	3,269	4,158	6,035	4,213	6,192
01.05.2017	6,029	5,485	4,746	7,110	3,269	4,259	6,268	4,703	6,995
01.06.2017	6,071	5,691	4,817	7,435	3,269	4,278	6,343	4,869	7,359
01.07.2017	6,072	5,714	4,817	7,578	3,269	4,302	6,344	4,869	7,475
01.08.2017	6,073	5,730	4,817	7,726	3,269	4,306	6,344	4,869	7,591
01.09.2017	6,076	5,731	4,817	7,871	3,269	4,307	6,345	4,869	7,629
01.10.2017	6,091	5,835	4,827	8,178	3,269	4,492	6,363	5,046	7,664
01.11.2017	6,247	6,125	4,931	8,625	3,269	4,973	6,525	5,349	8,122
01.12.2017	6,883	6,853	5,299	9,457	3,269	5,947	7,003	6,106	8,871
01.01.2018	7,735	7,796	5,977	10,614	3,591	7,166	7,603	6,994	9,993

Monatsverbrauch [kWh/Monat]									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jan 17	158	417	521	887	680	288	1,385	475	1,094
Feb 17	1,028	260	369	1,064	237	513	770	284	994
Mrz 17	548	19	415	818	0	226	386	630	760
Apr 17	291	343	285	631	0	101	233	490	803
Mai 17	42	206	71	325	0	19	75	166	364
Jun 17	1	23	0	143	0	24	1	0	116
Jul 17	1	16	0	148	0	4	0	0	116
Aug 17	3	1	0	145	0	1	1	0	38
Sep 17	15	104	10	307	0	185	18	177	35
Okt 17	156	290	104	447	0	481	162	303	458
Nov 17	636	728	368	832	0	974	478	757	749
Dez 17	852	943	678	1,157	322	1,219	600	888	1,122

Bezugsgrößen									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
WFL [m ²]	73.67	72.95	64.13	79.14	72.92	64.09	76.25	73.79	63.7

Monatsverbrauch [kWh/m ² Monat]									
	WE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jan 17	2	6	8	11	9	4	18	6	17
Feb 17	14	4	6	13	3	8	10	4	16
Mrz 17	7	0	6	10	0	4	5	9	12
Apr 17	4	5	4	8	0	2	3	7	13
Mai 17	1	3	1	4	0	0	1	2	6
Jun 17	0	0	0	2	0	0	0	0	2
Jul 17	0	0	0	2	0	0	0	0	2
Aug 17	0	0	0	2	0	0	0	0	1
Sep 17	0	1	0	4	0	3	0	2	1
Okt 17	2	4	2	6	0	8	2	4	7
Nov 17	9	10	6	11	0	15	6	10	12
Dez 17	12	13	11	15	4	19	8	12	18

Abbildung 59 Wärmeverbrauch 2017 monatlich bezogen auf die Grundfläche – Haus 3

In einem weiteren Schritt wurde der gemessene Heizwärmebedarf der WE pro Gebäude zusammengefasst und bezogen auf die jeweilige Gesamtwohnfläche dargestellt. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick zu den ermittelten Werten. Die Darstellung erfolgt anhand der Werte für 2017, da Haus 3 erst Anfang 2017 bezogen wurde. Zu beachten ist,

dass die WE 5 in Haus 3 nach wie vor nicht belegt ist. Da sie sich jedoch in mittlerer Geschosslage befindet, kann der Einfluss auf den Gesamtwärmeverbrauch des Gebäudes nahezu vernachlässigt werden.

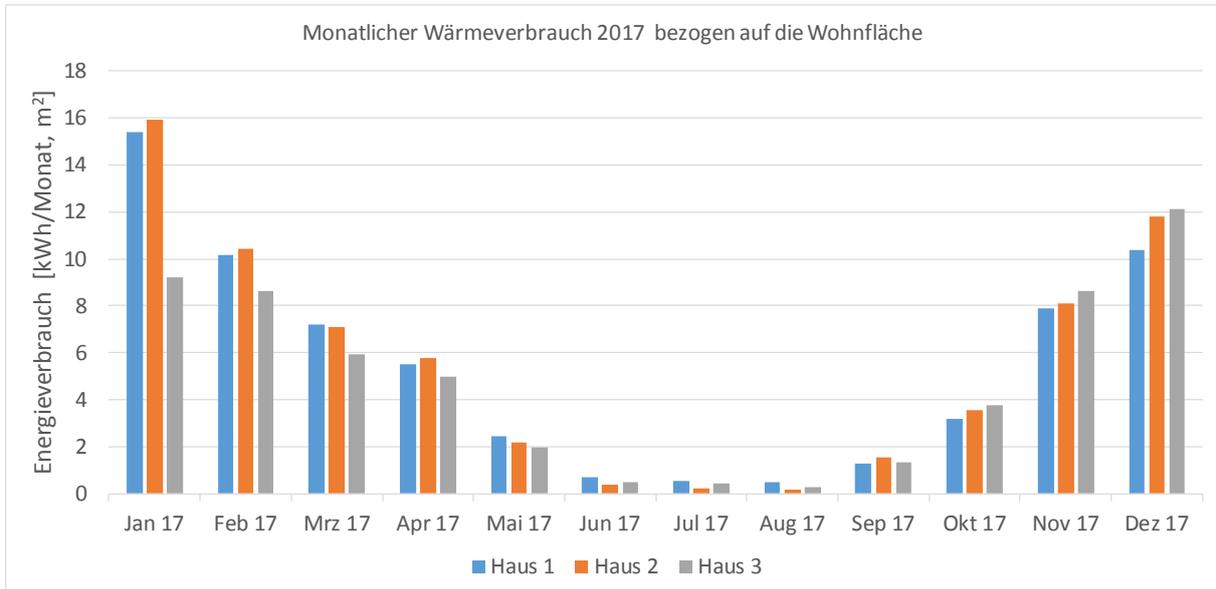


Abbildung 60 Vergleich der flächennormierten monatsbezogenen Heizenergieverbrauchswerte für die betrachteten Gebäude (Basis: Wohnfläche)

Bei der vorstehenden Betrachtung wurde vernachlässigt, dass die Erwärmung des Trinkwarmwassers in Haus 1 erst in der WAST erfolgt. Die dafür benötigte Energiemenge wird gemeinsam mit der Heizenergie am Eingang zur WAST erfasst. Sie muss demnach aus dem Heizenergieverbrauch herausgerechnet werden. Das Resultat zeigt die folgende Abbildung.

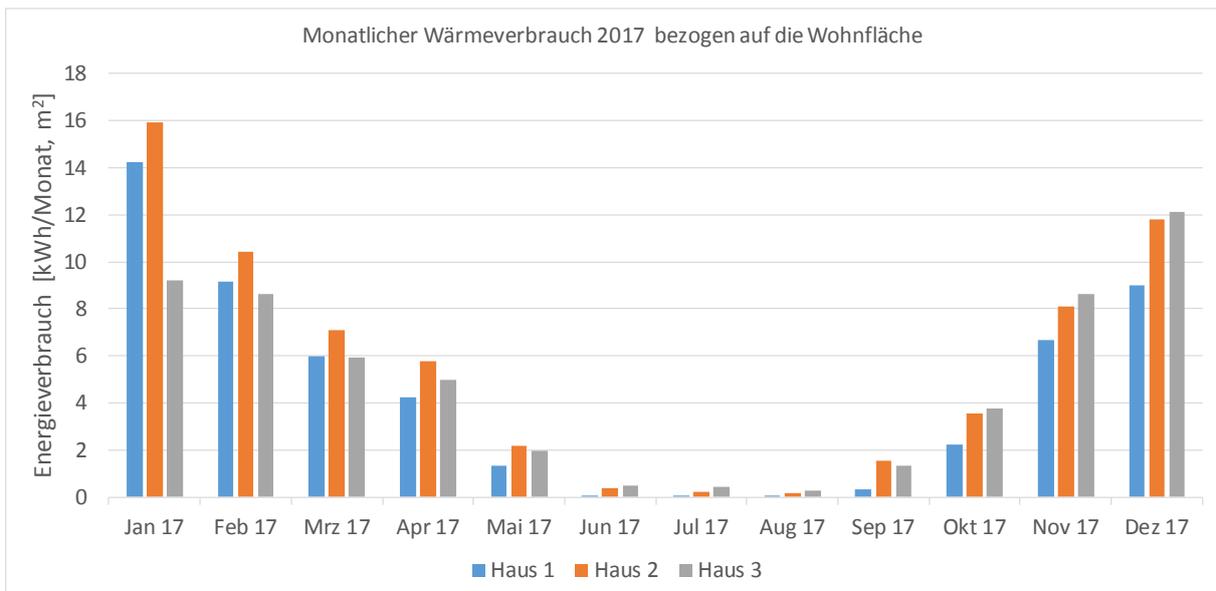


Abbildung 61 Vergleich der flächennormierten monatsbezogenen Heizenergieverbrauchswerte für die betrachteten Gebäude (Basis: Wohnfläche) – um Trinkwassererwärmung bereinigt

Zur erforderlichen Abschätzung der für die Trinkwassererwärmung zu berücksichtigenden Wärmemenge in Haus 1, wurden die monatlichen Verbrauchsmengen mit den Temperaturdifferenzen aus den erfassten Trinkwassertemperaturen multipliziert. Mit der spezifischen Wärmekapazität $c_{\text{Wasser}} = 4,19 \text{ kJ/kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ wurde die benötigte Energiemenge berechnet. Nach erfolgter Umrechnung in kWh wurden die Werte von den monatlichen Wärmeverbrauchswerten abgezogen, so dass ein bereinigtes Ergebnis für den Vergleich mit Haus 2 und Haus 3 zur Verfügung steht. Wie die Grafik in Abbildung 61 zeigt, liegen die wohnflächenbezogenen Heizenergiebedarfswerte in Haus 1 etwas unter denen aus Haus 2 und 3. Begründet werden kann dies zum einen in der besseren Wärmedämmung in Haus 1. Einen weiteren wesentlichen Einfluss hat jedoch die Lüftungstechnik (in Haus 1 sind Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnungseinrichtungen vorhaben, Haus 2 und 3 hingegen verfügt nur über eine zentrale Abluftanlage – vgl. dazu auch Abschnitt 1.2.2).

1.4.4.3 Betrachtung des Wärmeverbrauchs im Kontext zur Transmissionswärmeverlustfläche

Der wohnflächenbezogene Energiebedarf einer WE ($\text{kWh/m}^2\text{Jahr}$) dient in erster Linie dazu, dem Mieter / Eigentümer einen Anhaltspunkt zu bieten, welcher Aufwand zur Heizung der Wohneinheit zu erwarten ist. Aus energetischer Sicht müssen für vergleichende Betrachtungen folgende Parameter einbezogen werden:

- die Transmissionswärmeverluste (Resultat aus Größe und Qualität der wärmeübertragenden Hüllfläche – bestehend aus Wänden, Fenstern, Böden und Decken zu unbeheizten Räumen)
- die Lüftungswärmeverluste (verursacht durch mechanische Lüftung und Fensterlüftung durch den Nutzer)
- die inneren Gewinne (Wärmeabgabe durch Nutzer, Elektrogeräte etc.)
- die Gewinne durch solaren Strahlungseinfall durch die Fenster.

Die Transmissionswärmeverluste können anhand der vorhandenen Daten (mittlerer U-Wert und Größe der wärmeübertragenden Hüllfläche und Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Außenluft) berechnet werden. Für die Lüftungswärmeverluste werden Ansätze für die Verluste durch die mechanische Lüftung getroffen. Anhand der Fensteröffnungszyklen werden die nutzerbedingten Lüftungswärmeverluste abgeschätzt. Hinsichtlich der inneren Gewinne kann unterstellt werden, dass diese in allen WE vergleichbar sind (bei ähnlicher Belegung und technischer Ausstattung), so dass diese als einheitlicher Pauschalwert pro WE angesetzt werden. Zur Bewertung des Einflusses der solaren Gewinne auf die Wärmebilanz erfolgt anschließend eine vergleichende Betrachtung nach Fassadenausrichtung.

Um den Einfluss bzw. den Anteil der verschiedenen Bilanzgrößen zu analysieren wurde eine entsprechende Betrachtung über einen Zeitraum von zwei Monaten (01.12.2016 – 31.01.2017) angestellt. Dabei wurden

- (1) die temperaturspezifischen Transmissionswärmeverluste für die raumumschließenden, wärmeübertragenden Flächen (Mauerwerk und Fensterflächen, Kellerdecke sowie oberste Geschossdecke raumweise anhand der Flächengrößen und der U-Werte zusammengestellt (Berücksichtigung der Wärmebrücken pauschal mit einem Aufschlag von 10%),
- (2) die raumkonkreten Temperaturdifferenzen, zwischen der Raumluft und der Lufttemperatur außen, im unbeheizten Dachraum und im Keller im Stundenraster errechnet,
- (3) die Transmissionswärmeverluste aller Räume auf der Basis von (1) und (2) im Stundenraster berechnet und zu Tagessummen pro WE aufsummiert und
- (4) mit den messtechnisch erfassten Wärmeverbrauchswerten pro WE für die entsprechenden Tage verglichen.

Die nachfolgenden Abbildungen enthalten beispielhaft zwei grafische Darstellungen der Transmissionswärmeverluste im Vergleich mit der zugeführten Wärmeenergie. Die rot dargestellten Temperaturen in der Außenluft wurden als Tagesmittelwerte aufgetragen.

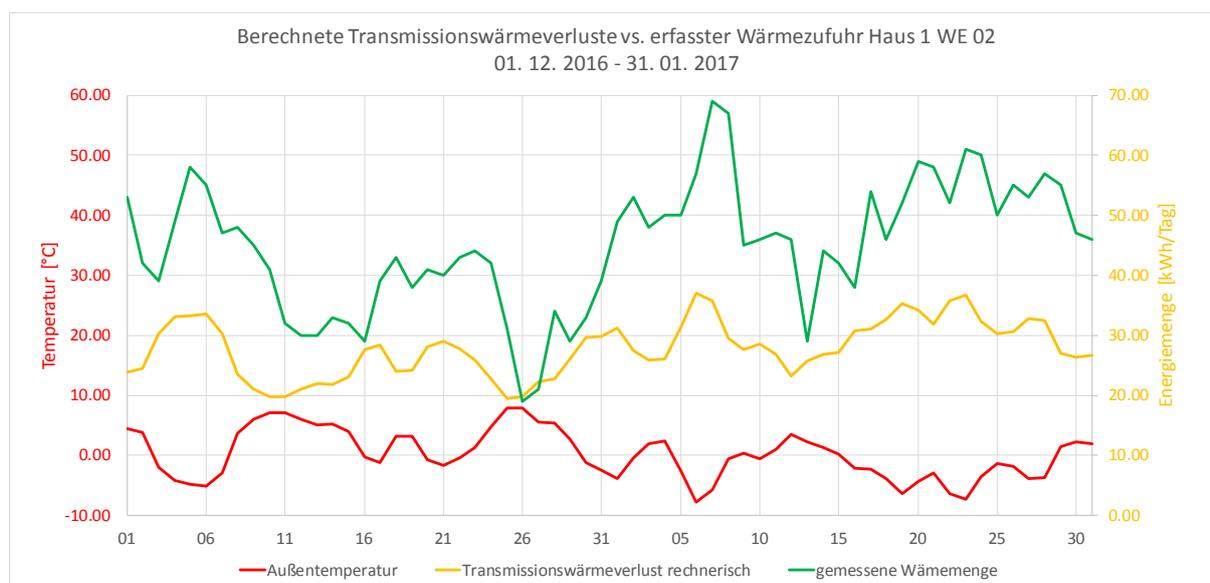


Abbildung 62 Vergleich der berechneten Transmissionswärmeverluste mit den verbrauchten Wärmemengen – Beispiel 1

Es ist deutlich erkennbar, wie sowohl die berechneten Transmissionswärmeverluste als auch der tatsächlich angefallene Heizwärmeverbrauch in Abhängigkeit der Außentemperatur schwanken.

Während in Beispiel 1 (Abbildung 62) relativ hohe Wärmeverbrauchswerte beobachtet werden können (es werden teils bis zu 70 kWh pro Tag verbraucht), liegen die Verbrauchswerte ebenso wie die berechneten Transmissionswärmeverluste in Beispiel 2 (Abbildung 63) deutlich niedriger. Dies wird auf die nachfolgend beschriebenen Ursachen zurückgeführt.

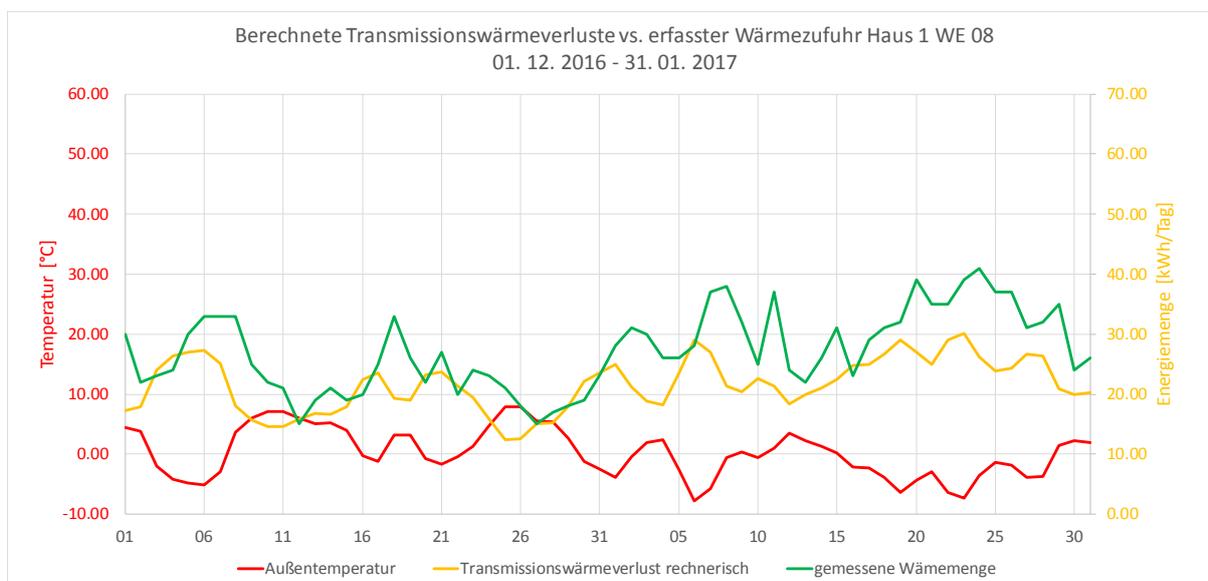


Abbildung 63 Vergleich der berechneten Transmissionswärmeverluste mit den verbrauchten Wärmemengen – Beispiel 2

Die WE aus Beispiel 1 befindet sich im Erdgeschoss, die WE aus Beispiel 2 hingegen befindet sich bei vergleichbarer Ausrichtung im Dachgeschoss. In der nachfolgenden Tabelle sind die U-Werte der einzelnen Hüllflächenelemente zusammengestellt. Anhand dieser Werte wird deutlich, dass die energetische Qualität der thermischen Hülle im DG etwas besser ist als im EG. Die Lufttemperaturen im unbeheizten Dachraum liegen deutlich unter denen im Keller, was jedoch durch die bessere Dämmung der obersten Geschossdecke kompensiert wird.

Tabelle 16 U-Werte der Hüllflächenelemente

Hüllflächenelement	U-Wert
Außenwand EG und OG	0,33
Außenwand DG	0,19
Fenster	1,4
Kellerdecke	0,26
Oberste Geschossdecke	0,14

Tabelle 17 Vergleich der aggregierten Wärmeverbrauchsdaten beider Beispiele über den Vergleichszeitraum

	Transmissionswärmeverlust rechnerisch	Wärmeverbrauch
Beispiel 1	1.724	2784
Beispiel 2	1.336	1688
Delta	388	1.096
Prozentual (B2 / B1)	77,5 %	60,6 %

Interessant am hier dargestellten Vergleich ist, dass beide WE eine identische Fassadenausrichtung und einen nahezu gleichen Grundriss aufweisen (Beispiel 1: 80,6 m² / Beispiel 2: 82,17 m²). Auch ist der Anteil der Fensterflächen nahezu identisch (in Beispiel 1 geringfügig größer).

Neben Unterschieden in der Lage verschiedener WE im Gebäude und der Beschaffenheit der thermischen Hülle spielt demnach das Nutzerverhalten eine wichtige Rolle für die Gesamtwärmeverluste einer Wohnung. So ist beispielsweise die Differenz aus der zugeführten Wärme und der berechneten Transmissionswärmeverluste in Beispiel 1 in den meisten Fällen größer als in Beispiel 2, was auf eine höhere Lüftungsrate schließen lässt. Ein Vergleich der über den gesamten Betrachtungszeitraum gemittelten Raumtemperaturen ergab nur eine minimale Differenz von weniger als 0,5 K. Die Analyse des Lüftungsverhaltens ist Gegenstand des nachfolgenden Abschnitts.

Eine vollständige Darstellung der Transmissionswärmeverluste gem. Beispiel 1 und 2 für das gesamte Gebäude findet sich im vertraulichen Teil der Anlage (V08).

1.4.4.4 Analyse des Lüftungsverhaltens

Zur differenzierten Betrachtung des Lüftungsverhaltens wurden die Fensteröffnungsvorgänge mittels extra eingebrachter Fensteröffnungskontakte aufgezeichnet. Da einige Verbindungsleitungen beim Ausbau der Gebäude offenbar beschädigt wurden, können nur ausgewählte Aufzeichnungen für eine genauere Auswertung herangezogen werden. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die verfügbaren Daten.

Tabelle 18 Datenverfügbarkeit Fensteröffnungskontakte

	Haus 1	Haus 2	Haus 3
WE 01	teilweise verfügbar	teilweise verfügbar	verfügbar
WE 02	verfügbar	verfügbar	verfügbar
WE 03	Hardware defekt	verfügbar	verfügbar
WE 04	verfügbar	verfügbar	verfügbar
WE 05	verfügbar	verfügbar	teilweise verfügbar
WE 06	verfügbar	verfügbar	verfügbar
WE 07	teilweise verfügbar	teilweise verfügbar	teilweise verfügbar
WE 08	teilweise verfügbar	teilweise verfügbar	verfügbar
WE 09	teilweise verfügbar	verfügbar	verfügbar
WE 10	-	verfügbar	-

Anders als bei den im Zeitraster erfassten Daten, werden die Änderungen des Fensteröffnungsstatus ereignisbasiert aufgezeichnet. Das bedeutet, immer dann, wenn ein Fenster in der WE geöffnet oder geschlossen wird, erfolgt die Ablage des aktuellen Status aller Fenster der WE mit einem entsprechenden Zeitstempel. Zur Verarbeitung der Daten musste daher zunächst für jeden Fensterkontaktkreis eine Matrix erzeugt werden, in denen die entsprechenden Zustände (Zustandsänderungen) als Matrixelemente eingetragen wurden. Die

Struktur der Matrizen entspricht im Wesentlichen der in Abschnitt 1.4.3.2 beschriebenen Prüfmatrix (vgl. dazu auch Abbildung 37). Die Matrizen wurden jeweils für einen Jahreszeitraum mit einem Sekundenraster angelegt – damit ergeben sich pro Matrix 31.536.000 Matrixelemente pro Fensterkontaktkreis. In einem nächsten Schritt wurden die zunächst leer verbliebenen Matrixelemente mit dem zuvor festgestellten Zustand versehen. Die Ergebnismatrix enthält demnach pro Sekunde einen Eintrag, ob das jeweilige Fenster geöffnet oder geschlossen ist. Abschließend erfolgt eine Summenbildung, so dass im Ergebnis eine zeilenweise Ausgabe der stündlichen Öffnungsdauer der Fenster in Sekunden erzeugt werden kann.

Für eine erste Visualisierung erfolgte ein Plot der Werte (geöffnete Sekunden pro Stunde) über den jeweiligen Jahreszeitraum. Die folgende Abbildung enthält zwei Beispielplots.

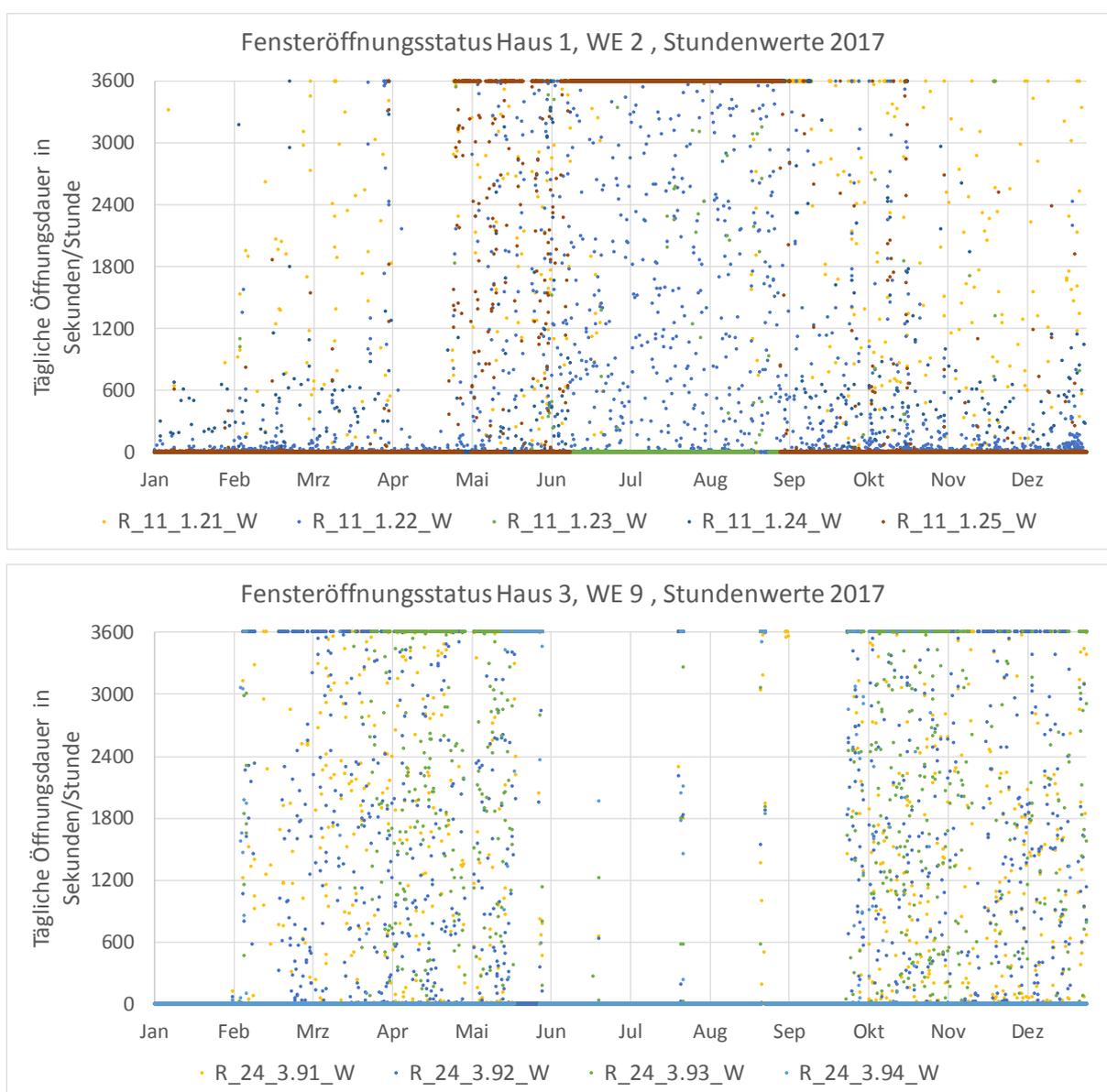


Abbildung 64 Zwei ausgewählte Beispiele für die Erstausswertung des Fensteröffnungsstatus

Bereits hier ist erkennbar, dass beispielsweise bestimmte Fenster nur in den Sommermonaten länger geöffnet sind (obere Grafik) und ob die WE zeitweilig leer stand (untere Grafik) z.B. durch urlaubsbedingte Abwesenheit oder Mieterwechsel / Mietunterbrechung. Auch ist erkennbar, dass einige Fenster scheinbar ständig geöffnet sind, was auf einen Defekt des Fensterkontaktes zurückgeführt werden kann. Diese Daten sind von weiteren Betrachtungen herauszufiltern und auszuschließen. Die Plots aller WE für das Jahr 2017 sind in der Anlage V09 enthalten.

Um zu aussagefähigeren Aussagen zu gelangen, wurden monatliche Summen der Fensteröffnungszeiten in Minuten gebildet und als Balkengrafik dargestellt. Als Maximalwert wurde in allen Darstellungen der Wert 45.000 eingestellt (ein Monat mit 31 Tagen entspricht 44.640 Minuten). Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft eine der Darstellungen. Ein kompletter Satz der Diagramme für 2017 ist in der Anlage enthalten.

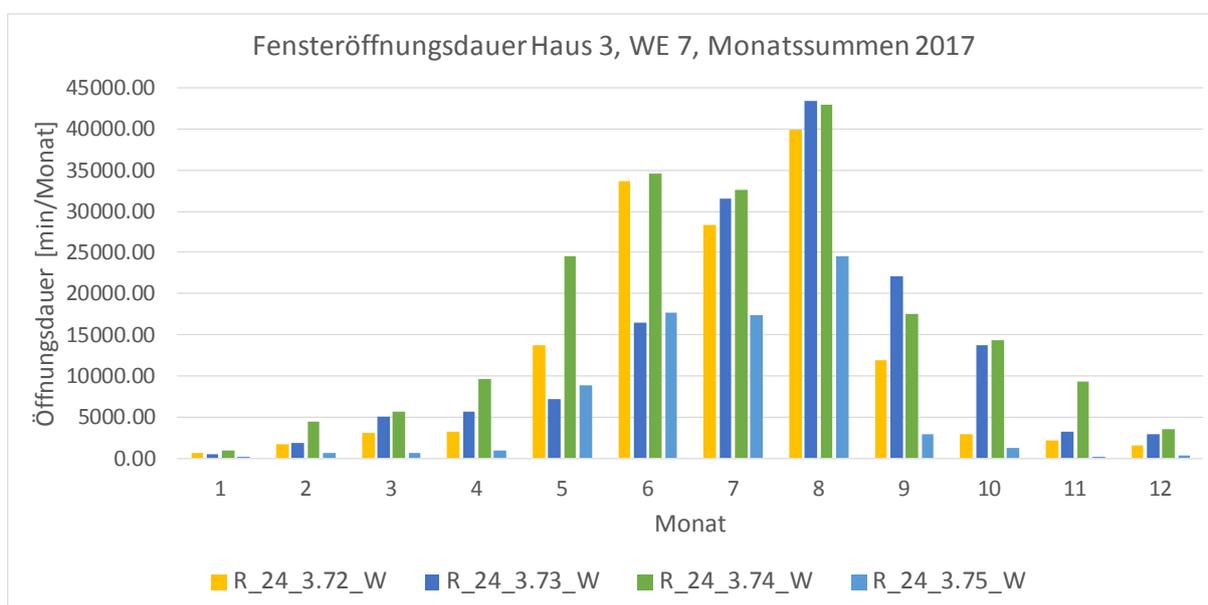


Abbildung 65 Monatliche Summen der Fensteröffnungsminuten - Beispielgrafik

Die Grafik zeigt deutlich die höhere Fensterlüftung in den Sommermonaten. Allerdings muss in einigen Fällen festgestellt werden, dass Fenster scheinbar über nahezu den gesamten Monat geöffnet sind. Da dies insbesondere in den Wintermonaten nicht plausibel nachvollziehbar ist, müssen diese Fälle von der Betrachtung ausgeschlossen werden.

Um den Einfluss des Lüftungsverhaltens auf den Energieverbrauch der WE näher zu betrachten, erfolgt im Nachgang eine gesonderte Untersuchung, welche die Überlagerung der Wärmeverbrauchsdaten mit den Fensteröffnungszeiten zum Gegenstand hat. Dazu werden die Fensteröffnungszeiten der Räume zu WE gruppiert, und mit den monatlichen Verbrauchsdaten ins Verhältnis gesetzt. Der Vergleich erfolgt für die Monate des ersten und des vierten Quartals 2017.

Tabelle 20 Verbrauch nach Geschosslage im ersten Quartal 2017

Geschoss	Verbrauch [kWh]	Bezugsfläche [m ²]	Verbrauch pro Bezugsfläche [kWh/m ²]
EG	17.401	558	31,2
OG1	15.567	566	27,5
OG2	3.875	131	29,5
DG	14.370	537	26,7

Tabelle 21 Verbrauch nach Geschosslage im vierten Quartal 2017

Geschoss	Verbrauch [kWh]	Bezugsfläche [m ²]	Verbrauch pro Bezugsfläche [kWh/m ²]
EG	12.820	558	23,0
OG1	12.401	566	21,9
OG2	2.751	131	21,0
DG	11.324	537	21,1

Als weitere Einflussgröße wurde die Fassadenzugehörigkeit der WE untersucht. Die nachstehende Abbildung zeigt die genaue Ausrichtung der Gebäude.

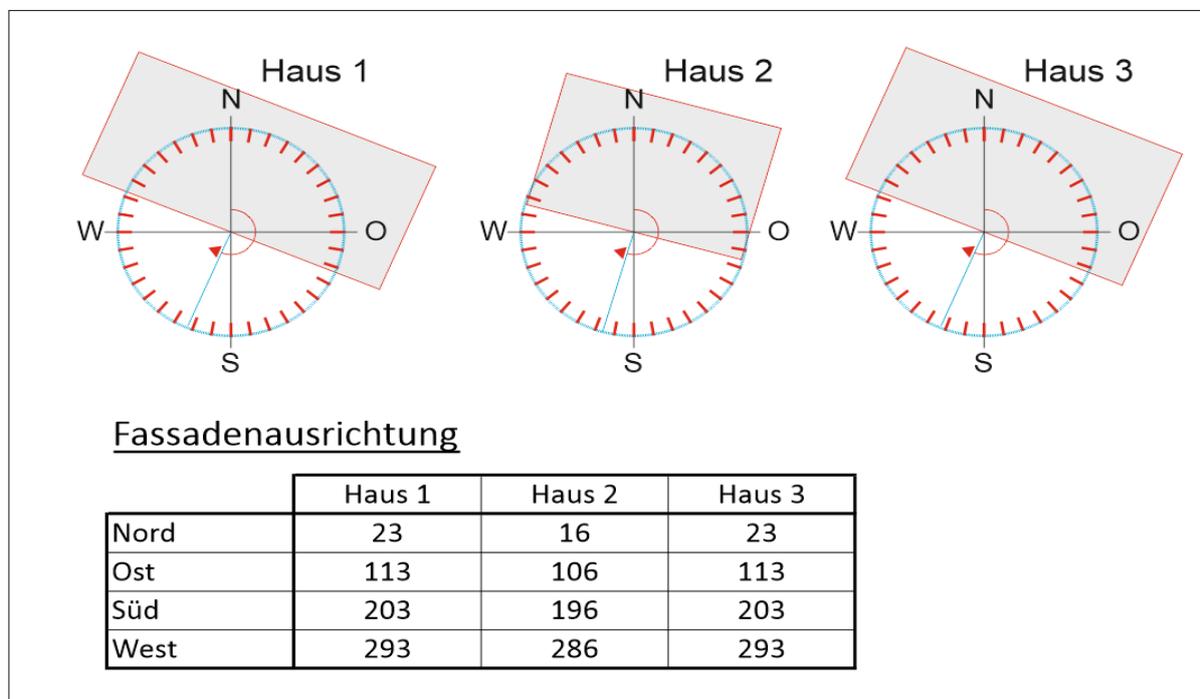


Abbildung 67 Schematische Darstellung der Gebäudeausrichtung (unter anderem Eingangsparameter für die Berechnung von Verschattung und solaren Gewinnen bei der Gebäudesimulation)

Tabelle 22 Verbrauch nach Fassadenausrichtung im ersten Quartal 2017

Ausrichtung	Verbrauch [kWh]	Bezugsfläche [m ²]	Verbrauch pro Bezugsfläche [kWh/m ²]
NW	11.916	417	28,6
NO	18.955	652	29,1
S	2.185	89	24,6
SW	18.156	635	28,6

Tabelle 23 Verbrauch nach Fassadenausrichtung im vierten Quartal 2017

Ausrichtung	Verbrauch [kWh]	Bezugsfläche [m ²]	Verbrauch pro Bezugsfläche [kWh/m ²]
NW	8.907	417	21,4
NO	14.869	652	22,8
S	1.086	89	12,2
SW	14.435	635	22,7

Erwartungsgemäß fallen die Verbrauchswerte der ganz oder teilweise nach Süden ausgerichteten WE günstiger aus. Zwischen den übrigen Lagen hingegen treten kaum spürbare Unterschiede auf.

1.4.5.2 Detaillierte zeitliche Betrachtung des Heizenergieverbrauches

Zur zeitlichen Verteilung des Wärmebedarfs der WE wurden ausgewählte Wochentage sowie ausgewählte Tage an Wochenenden betrachtet. Die nachfolgende Abbildung beinhaltet ein Beispiel für die grafische Darstellung der Bedarfskennlinien.

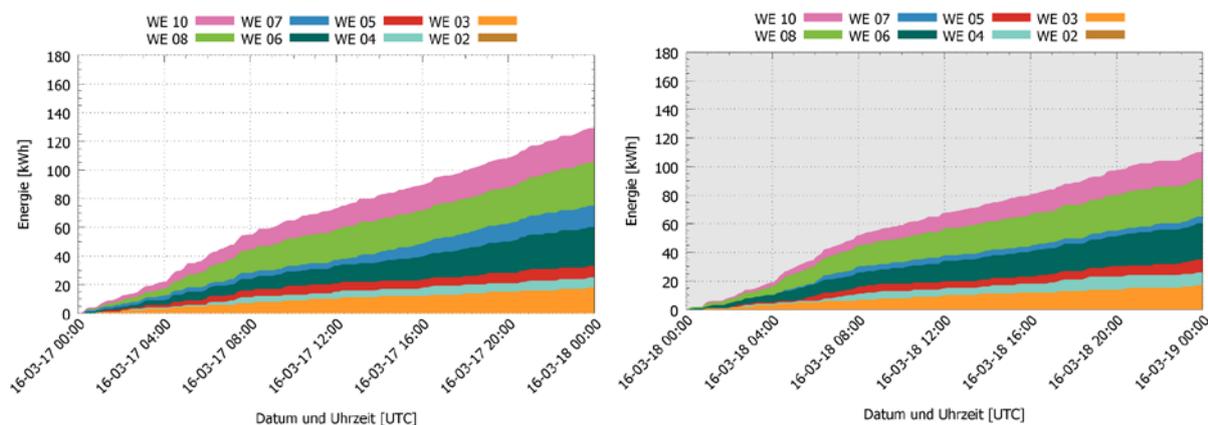


Abbildung 68 Beispiel für den Tagesverlauf des Heizenergieverbrauches (links an einem Wochentag, rechts im Bild der Tag an einem Wochenende)

Im Ergebnis der Betrachtung ist für den Wochenendfall erwartungsgemäß ein höherer Heizwärmeverbrauch als an Wochentagen, bei vergleichbaren Außentemperaturen, zu registrieren. Die Anwesenheit / der Einfluss der Nutzer auf die Verbrauchswerte ist deutlich erkennbar. So verläuft die Kurve am Wochenende gleichmäßiger, es gibt keinen sprunghaften Anstieg in den späten Nachmittags- / Abendstunden (Feierabendeffekt).

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen war die detaillierte Betrachtung des zeitlichen Anfalls des Wärmebedarfs Raumheizung RH bzw. von RH und Trinkwassererwärmung TWE. Die sogenannte Gleichzeitigkeit spielt eine entscheidende Rolle bei der Dimensionierung von Wärmeversorgungssystemen.¹ In [9] wird Gleichzeitigkeit wie folgt definiert: „Durch die zeitliche Streuung der Leistungsspitzen einzelner Abnehmer in Versorgungsnetzen verringert sich die maximale Gesamtleistung gegenüber der Summe der nominellen Nennleistungen der einzelnen Abnehmer.“ Als Formel berechnet sich der Gleichzeitigkeitsfaktor als maximale Leistungsanforderung der Gruppe dividiert durch die Summe der Nennleistungen der Abnehmer.

$$f_{GLF} = \frac{(\sum_{k=1}^n \dot{Q}_k(t))_{\max}}{\sum_{k=1}^n \dot{Q}_{k,nenn}} \quad k = 1 \dots n \text{ Abnehmer/WE}$$

Die Bestimmung der Nennwärmeleistung der Abnehmer/WE wurde approximiert. In jedem Haus ist ein Wärmeerzeuger (Brennwertherme) mit einer Leistung von 33 kW Nennleistung installiert. Die Nennwärmeleistung der Abnehmer je Haus wurde prozentual angepasst, d.h. für Haus 2 je WE liegt eine Nennwärmeleistung von 3,3 kW an. Diese vereinfachende Annahme führt zu $f_{GLF} > 1$ für kleine k (siehe Abbildung 71 und Abbildung 72).

Die messdatenbasierte Analyse der Gleichzeitigkeit anhand der WMZ-Daten wurde für den Zeitraum von September 2015 bis Juni 2017 (21 Monate) durchgeführt. Da Haus 3 in diesem Zeitraum unbewohnt war, wurden nur Haus 1 und 2 betrachtet. In Tabelle 24 sind die berechneten Gleichzeitigkeitsfaktoren dargestellt.

Tabelle 24 Berechnete Gleichzeitigkeitsfaktoren für den Zeitraum von September 2015 bis Juni 2017 für die Häuser 1 und 2

	Haus 1 (k=9)	Haus 2 (k=10)
f_{GLF}	0,72	0,63

Darüber hinaus ist es möglich, aus den zur Verfügung stehenden Datensätzen je Wohneinheit theoretische Gleichzeitigkeiten abzuleiten. Die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten je Gruppengröße berechnet sich über den Binomialkoeffizienten:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)! \cdot k!}$$

¹ Die Auswertungen wurden unter Anleitung der Autoren im Rahmen des Oberseminars von Frau Charlotte Rohrbeck: Messdatenbasierte Analyse der Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs. TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, August 2017

Der Binomialkoeffizient gibt an, auf wie viele verschiedene Arten man k Objekte aus einer Menge von n verschiedenen Objekten auswählen kann, ohne Beachtung der Reihenfolge und ohne Mehrfachauswahl. Zum Beispiel gibt es für Haus 2 mit insgesamt 10 WE 252 Möglichkeiten, genau 5 Abnehmer auszuwählen.

In Abbildung 69 ist beispielhaft ein Ablaufplan zur Bestimmung der Gleichzeitigkeitsfaktoren für Haus 1 mit 9 WE dargestellt. Analog dazu wird für Haus 2 vorgegangen.

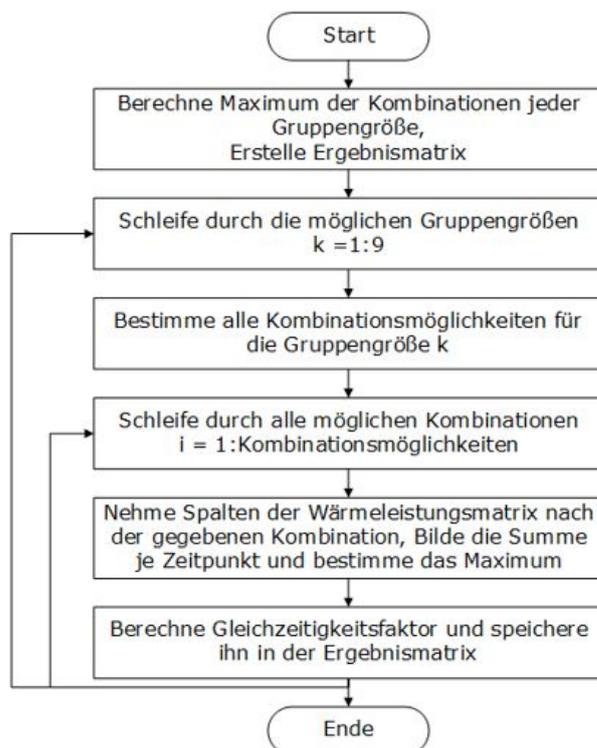


Abbildung 69 Ablaufplan zur Ermittlung der Gleichzeitigkeitsfaktoren am Beispiel Haus 1

Für die Darstellung der berechneten Gleichzeitigkeitsfaktoren werden sogenannte Box Plots (siehe Abbildung 70) verwendet. Diese zeigen die Lage und Streuung der berechneten Gleichzeitigkeitsfaktoren.

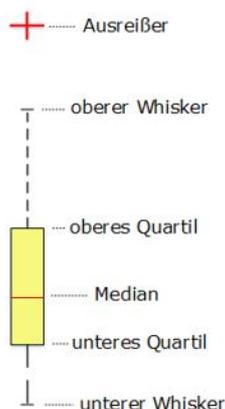


Abbildung 70 Box Plot

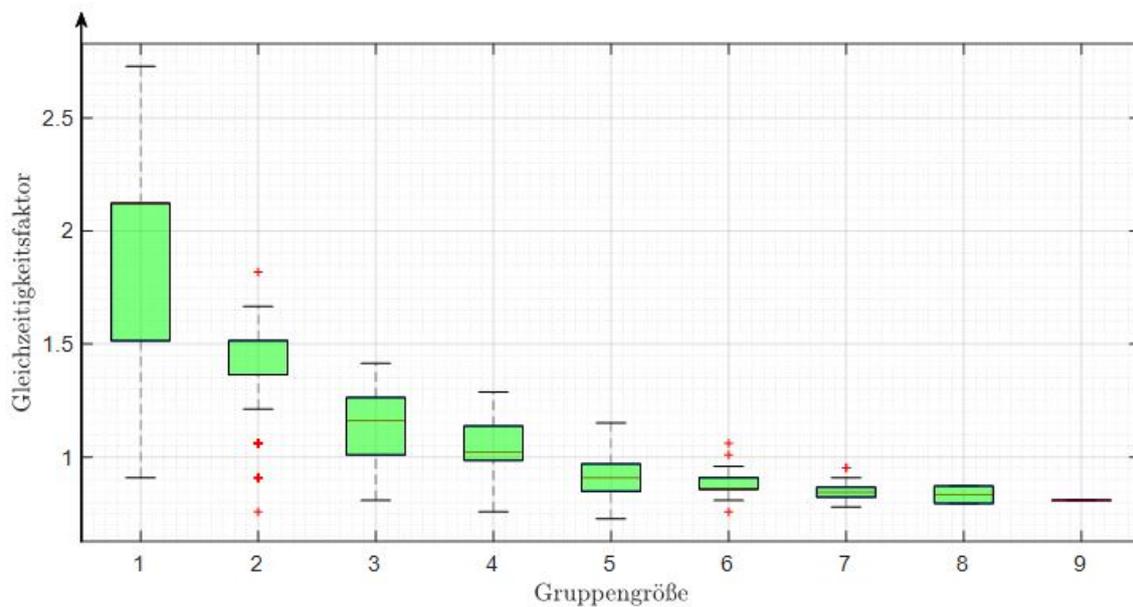


Abbildung 71 Über Kombinatorik ermittelte theoretische Bandbreite der Gleichzeitigkeitsfaktoren RH und TWE für Haus 1 (Gruppengröße = Anzahl der WE)

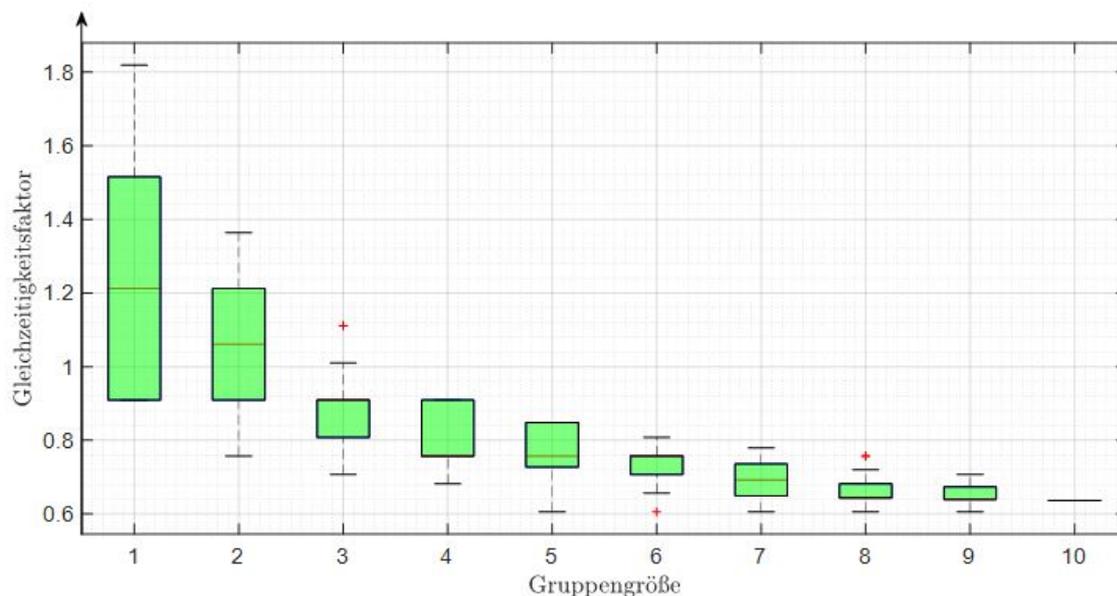


Abbildung 72 Über Kombinatorik ermittelte theoretische Bandbreite der Gleichzeitigkeitsfaktoren RH für Haus 2 (Gruppengröße = Anzahl der WE)

Es zeigt sich je mehr Abnehmer von einem Wärmeerzeuger versorgt werden, desto geringer ist der Gleichzeitigkeitsfaktor und desto kleiner kann der Wärmeerzeuger ausgelegt werden. Da im Haus 1 über die dezentralen Wohnungsanschlusstationen eine gemeinsame Versorgung von RH und TWE stattfindet, fällt die Gleichzeitigkeit erwartungsgemäß etwas höher aus als bei den nur für RH ermittelten Werten für Haus 2.

Um die Betrachtung für größere Gruppengrößen k – also eine größere Anzahl von WE als in den realen Häusern 1 und 2 - fortführen zu können, wurde die folgende Näherungsfunktion genutzt.

$$f_{gl}(k) = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{k}{c}\right)^d}$$

Dabei wurden die Koeffizienten a , b , c und d über die curve fitting Toolbox von Matlab® bestimmt. Diese sind Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25 Berechnete Koeffizienten der Näherungsfunktion

Koeffizient	Haus 1	Haus 2
a	0,39	0,49
b	11,77	9,79
c	0,17	0,18
d	0,87	0,99

In Abbildung 73 ist die erweiterte Betrachtung der Gleichzeitigkeitsfaktoren für verschiedene Ansätze dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Gleichzeitigkeit für Haus 1 mit RH+TWE bei geringer WE-Zahl etwas höherausfällt als für reine RH in Haus 2.

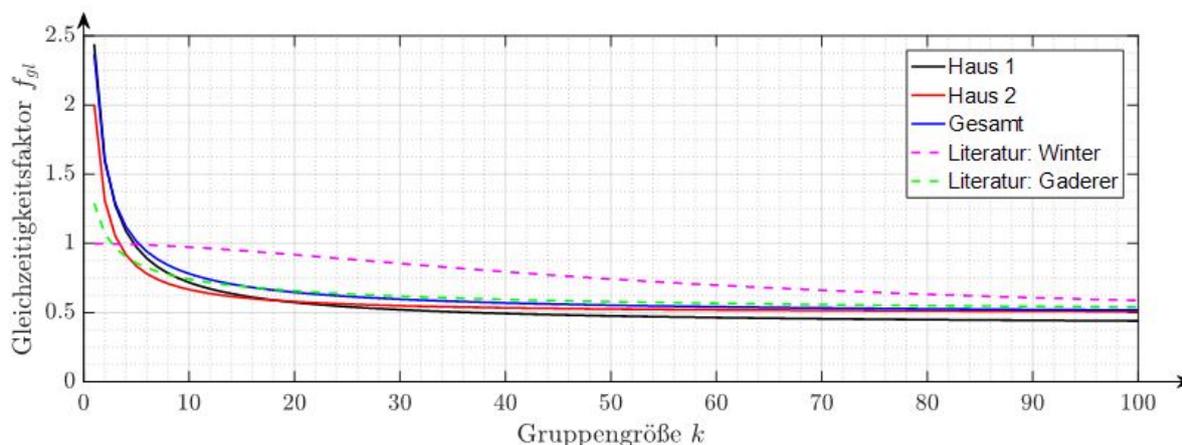


Abbildung 73 Theoretisch über Näherungsfunktion ermittelte Gleichzeitigkeitsfaktoren (Haus 1 = RH + TWE; Haus 2 = RH; Gesamt = Mischung aus allen Abnehmer Haus 1 und 2)²

² Die blaue Kurve ist ein rein mathematisches Kombinatorikergebnis aus Haus 1 und 2, welches jedoch keine praktische Relevanz hat, da Abnehmer mit RH + TWE und reine RH-Abnehmer gemischt wurden.

1.4.5.3 Analyse der Rücklauftemperaturen

Die Analyse der Rücklauftemperaturen (gemessen an den Wohnungsanschlüssen) wurde an ausgewählten WE aus Haus 1 und 2 vorgenommen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen zwei ausgewählte Beispiele. Die Darstellungen der übrigen Diagramme befinden sich in der Anlage.

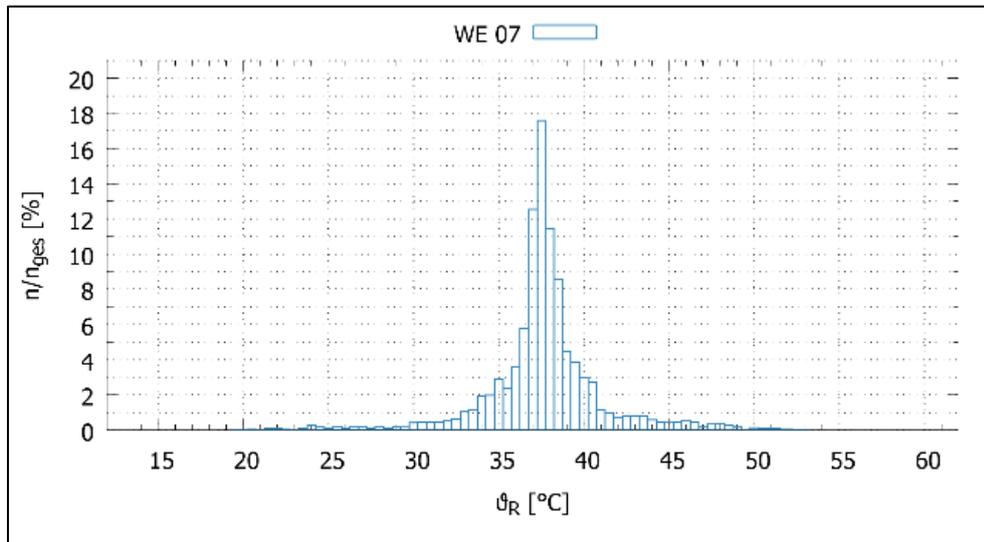


Abbildung 74 Rücklauftemperaturen aus WE 07 in Haus 1

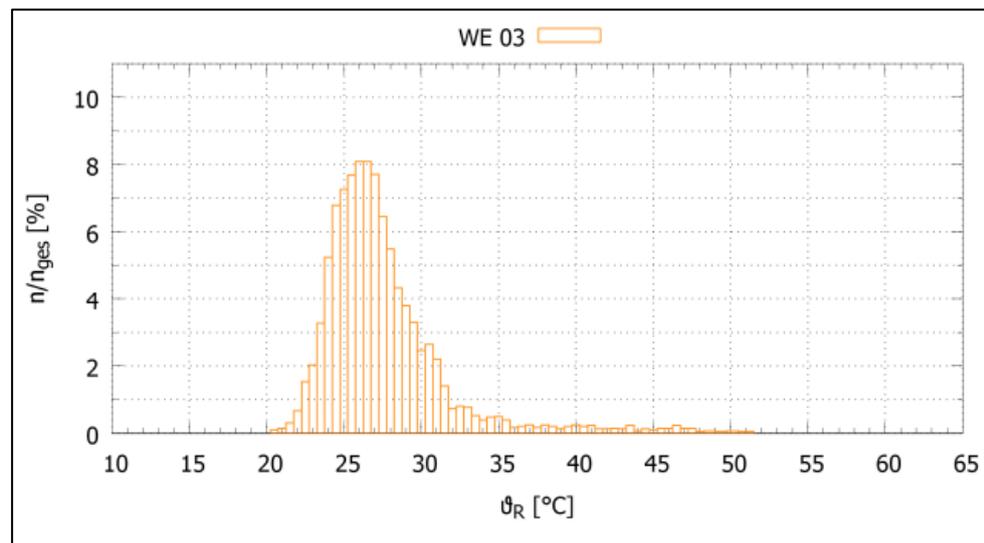


Abbildung 75 Rücklauftemperaturen aus WE 03 in Haus 2

In Haus 1 stellt sich eine relativ gleichmäßige Verteilung der Rücklauftemperaturen zwischen 30 und 45 °C ein, wobei die geringsten Werte in WE 2, die höchsten Werte aus WE 4 zu registrieren sind. Die Verteilung der Werte aus WE 6 fällt vergleichsweise flach aus. Die Verteilungen aus WE 8 und 9 zeichnen sich durch eine sehr steile Häufigkeitsverteilung aus.

In Haus 2 ist im Gegensatz zu Haus 1 keine einheitliche Verteilung erkennbar. Hier weisen die WE 2 und 4 sehr geringe Rücklauftemperaturen zwischen 12 °C und 18 °C auf. Bis auf drei WE, deren Rücklauftemperaturen zwischen 40 und 50 °C liegen, sind die Werte der übrigen WE deutlich niedriger.

1.4.5.4 Trinkwasser – Verbrauch, Gleichzeitigkeiten, Temperaturen

Der Wasserverbrauch (Warm- und Kaltwasser) liegt in der Datenbank in aufbereitete Form vor. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Verbrauchswerte über einen ausgewählten Zeitraum.

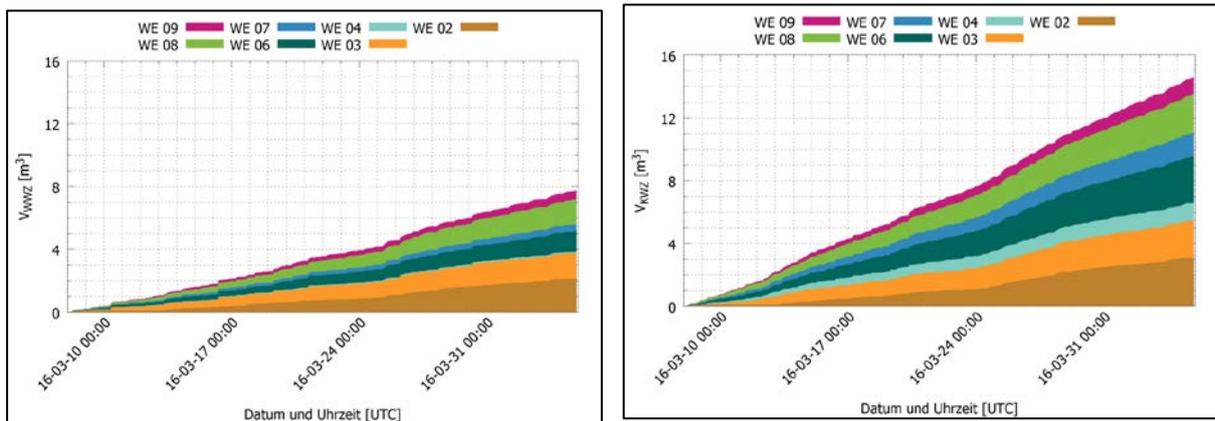


Abbildung 76 Wasserverbrauch Haus 1 (links im Bild Trinkwarmwasser, rechts im Bild der Kaltwasserverbrauch)

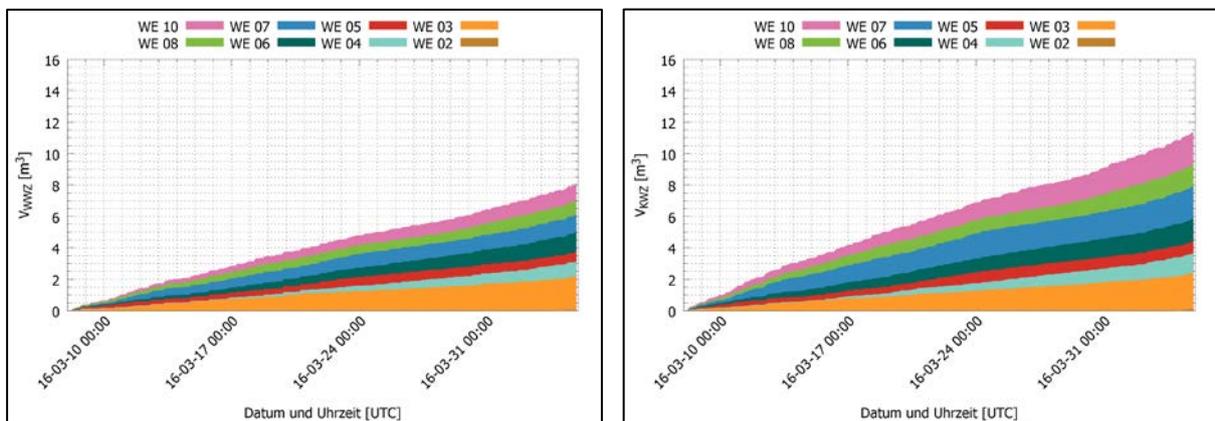


Abbildung 77 Wasserverbrauch Haus 1 (links im Bild Trinkwarmwasser, rechts im Bild der Kaltwasserverbrauch)

Die Häuser wurden mit umfangreicher Messtechnik in jeder Wohneinheit ausgestattet, sodass es grundsätzlich möglich ist, durch gezielte Auswertung der Warm- und Kaltwasserzählerdaten sowie zugehöriger Temperaturen auf Gleichzeitigkeitsfaktoren des kalten Trinkwassers (TWK) und des Trinkwarmwassers (TWW) zu schließen. Soweit auch Daten des für die

zentrale bzw. dezentrale Trinkwassererwärmung benötigten Wärmebedarfs vorliegen, kann überdies auf die Verluste bei der Trinkwarmwasserverteilung geschlossen werden.³

Folgende Aspekte wurden in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit herausgearbeitet:

- Vergleich der Verbrauchsprofile TWK und TWW über repräsentative Zeitabschnitte hinsichtlich Volumenstrom und Temperatur
- Bildung der Maximal-, Minimal- und Medianwerte je Wohneinheit
- Überlagerung zu dezentralen Gleichzeitigkeitsfaktoren der Entnahme für den Volumenstrom TWK und TWW sowie die geeignet zu berechnende Wärmemenge auf der Trinkwarmwasserseite

Die Auswahl der repräsentativen Zeiträume erfolgte unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien:

- alle Zähler haben auswertbare Datensätze,
- alle Wohnungen waren bewohnt.

Daraus ergab sich für Haus 1 ein Zeitraum von 01.03.2016 bis 28.09.2016, da anschließend ein Ausfall des Trinkwarmwasserzählers in WE 2 zu einem Datenausfall geführt hat. Für Haus 2 ein Zeitraum von 01.07.2016 bis 01.07.2017 und für Haus 3 ein sehr kurzer Zeitraum von 01.12.2017 bis 15.01.2018, da das Haus vorher nicht vollständig bewohnt war.

Verbrauch

Aus dem Tagesverlauf des Trinkwasserverbrauchs lassen sich zwei Verbrauchsprofile ableiten. Das erste Verbrauchsprofil „berufstätig“ ist gekennzeichnet durch einen geringen Wasserverbrauch unter der Woche. Nur in den Morgen- und Abendstunden wird Wasser verbraucht. Am Wochenende gibt es einen höheren Wasserverbrauch über den gesamten Tagesverlauf verteilt. Beim zweiten Verbrauchsprofil „zu Hause“ ist der Wasserverbrauch an allen Wochentagen in etwa gleich. Die Zapfungen verteilen sich über den gesamten Tagesverlauf. Unterschiedlich hohe Gesamtwasserverbräuche in den einzelnen Profilen lassen Rückschlüsse auf die Anzahl an Personen im Haushalt zu. Bei Betrachtung der Wasserverbräuche über mehrere Wochen lassen sich die Wohneinheiten in den 3 Häusern wie folgt einteilen:

Tabelle 26 Anzahl der WE bei Einteilung in zwei Verbrauchsprofile

Verbrauchsprofil	Haus 1 Anzahl der WE	Haus 2 Anzahl der WE	Haus 3 Anzahl der WE
„berufstätig“	5	8	3
„zu Hause“	4	2	6

³ Die Auswertungen wurden im Rahmen des Oberseminars von Frau Hanna Krüger: Messdatenbasierte Analyse der Gleichzeitigkeit des Trinkwasserverbrauchs in Mehrfamilienhäusern. TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, Juli 2018

Wie zu erwarten, ist der Warmwasserverbrauch in allen Wohnungen geringer als der Kaltwasserverbrauch. Es sind keine saisonalen Schwankungen zu erkennen. Es sind Wohnungen mit hohen, mittleren und niedrigerem durchschnittlichen Zapfvolumen zu erkennen. Bei den WE mit höherem Wasserverbrauch handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um Mehrpersonenhaushalte.

In den Abbildungen 78 bis 80 sind die Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkwarmwasser- und Trinkkaltwasserverbräuche je Haus und WE für die jeweiligen oben genannten repräsentativen Zeiträume in Box Plots dargestellt.

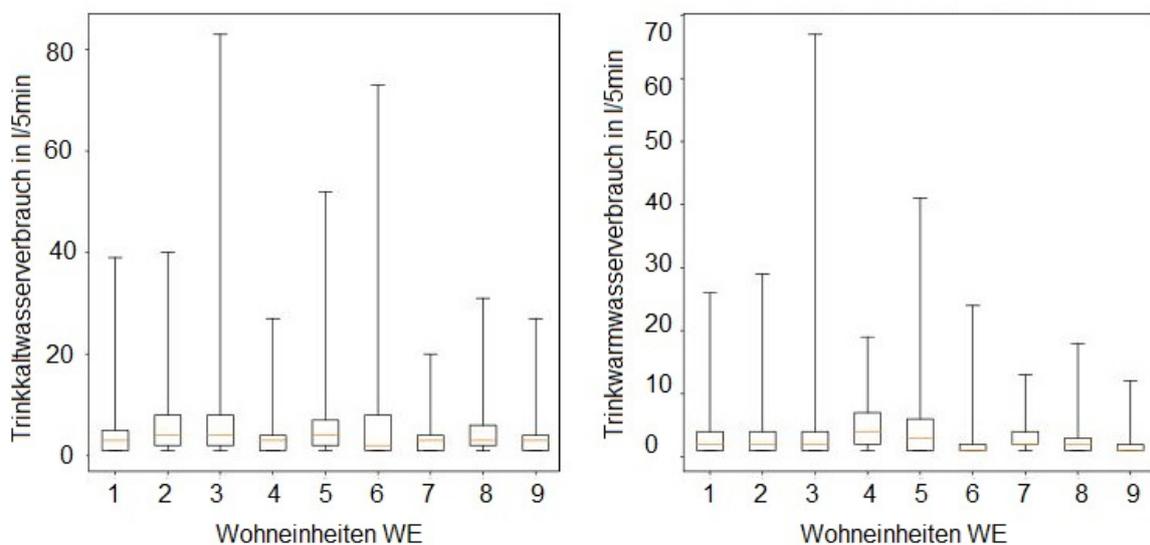


Abbildung 78 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkwasserverbräuche für jede einzelne WE im Haus 1 für den Zeitraum von 01.03.2016 bis 28.09.2016

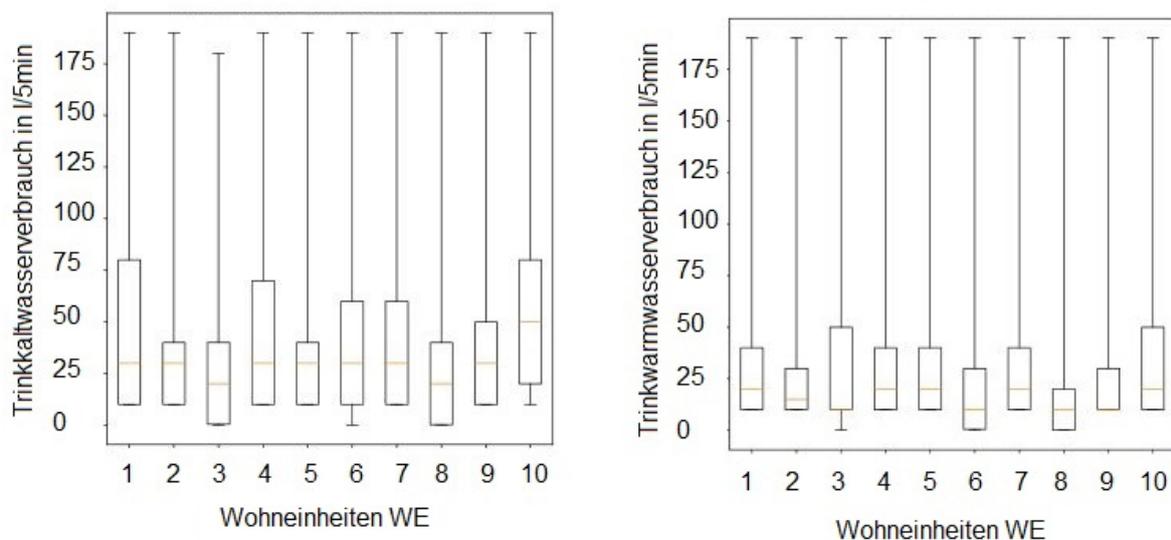


Abbildung 79 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkwasserverbräuche für jede einzelne WE im Haus 1 für den Zeitraum von 01.07.2016 bis 01.07.2017⁴

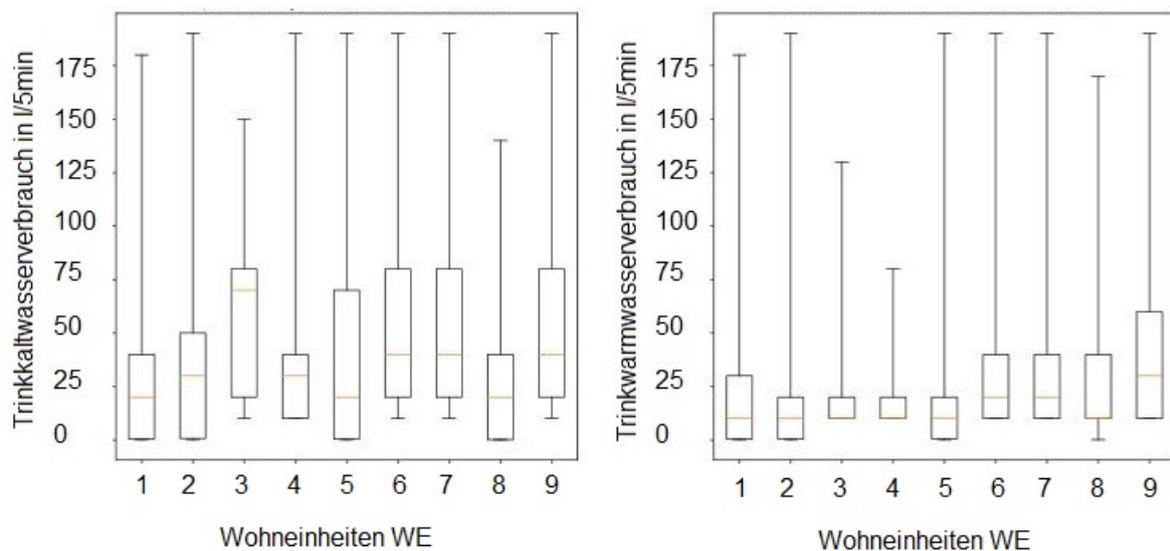


Abbildung 80 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkwasserverbräuche für jede einzelne WE im Haus 3 für den Zeitraum von 01.12.2017 bis 15.01.2018

⁴ Da durch Unstetigkeiten in der Volumenstrommessung teilweise punktuell hohe, unrealistische Entnahmemengen in den Datensätzen enthalten waren, hat Frau Krüger die Maximalwerte auf Basis einer nur bedingt gültigen Annahme begrenzt, die jedoch immer noch über den praktischen maximalen Entnahmemengen liegen. Minimal und Medianwerte sind für die WE realistisch, da die Anteile von Messwerten mit scheinbar extrem hohen Entnahmen sehr gering sind.

Temperaturen

In den Abbildungen 81 bis 83 sind die Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkkalt- und Trinkwarmwassertemperaturen je Haus und WE für die jeweiligen oben genannten repräsentativen Zeiträume in Box Plots dargestellt. Es handelt sich dabei um Temperaturen in der Nähe der jeweiligen Wasserzähler im endständigen, nicht zirkulierenden Bereich die als Anlegefühler auf die Rohrwand appliziert und mit der Standarddämmung versehen worden sind. Ausgewertet werden die Zeiträume ohne Differenzierung Entnahme/Nichtentnahme.

Durch die dezentrale Trinkwassererwärmung in Haus 1 gestalten sich die Temperaturverteilungen der einzelnen WE hinsichtlich der erreichten Maximalwerte TWW sehr individuell. Eine Trinkwasserzirkulation existiert dort nicht und die TWW-Temperaturen werden durch die Entnahmecharakteristik sowohl des TWW als auch des TWK bestimmt. Die Medianwerte für die Temperaturen TWW liegen nur ca. 1 bis 2 K über denen des TWK, da die Zeiten ohne TWW-Entnahme den Mittelwert dominieren.

Bei der zentralen Trinkwassererwärmung von Haus 2 und 3 kommt es zwischen den WE hinsichtlich der erreichten maximalen TWW-Temperaturen nur zu geringen Abweichungen, da hier die Dominanz des Wärmeleitungseinflusses der Zirkulation in die endständigen, nicht zirkulierenden Bereiche hinein auch in den Zeiten der Nichtentnahme wirkt. Mithin sind die kapazitiven Effekte deutlich geringer ausgeprägt.

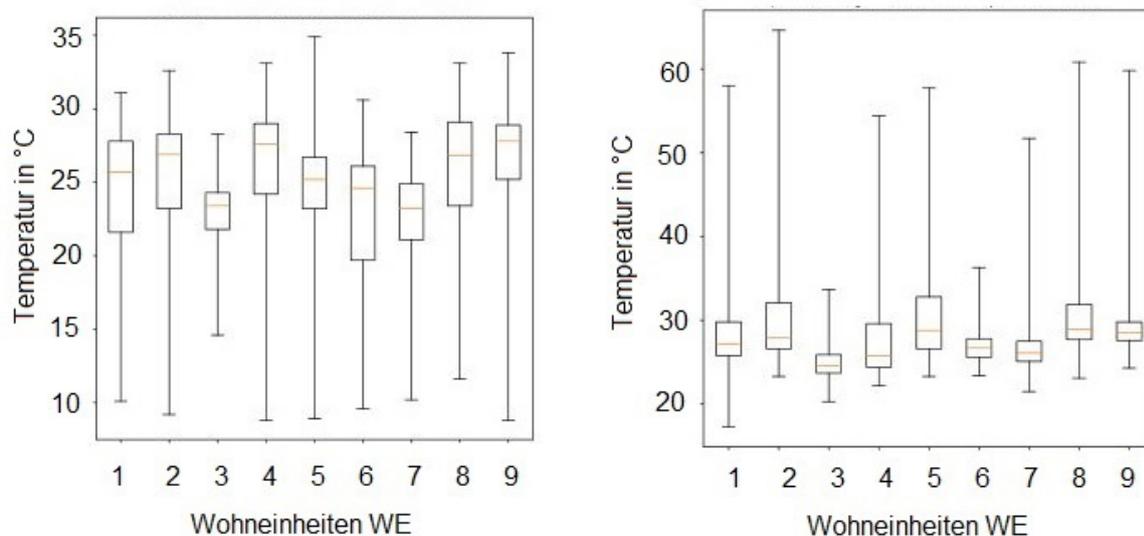


Abbildung 81 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Temperaturen für Haus 1 für den Zeitraum von 01.03.2016 bis 28.09.2016 (links im Bild Trinkkaltwasser, rechts im Bild Trinkwarmwasser)

In Haus 1 zeigt sich, dass die Trinkkaltwassertemperatur abhängig von der Umgebungstemperatur ist. Hingegen ist die Trinkwarmwassertemperatur bei der Entnahme über den Jahresverlauf recht konstant.

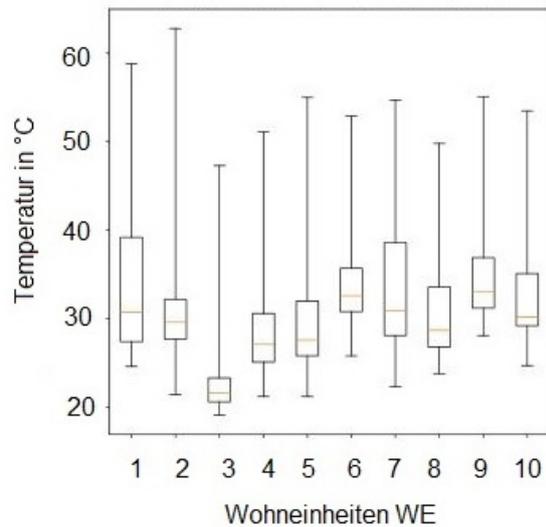
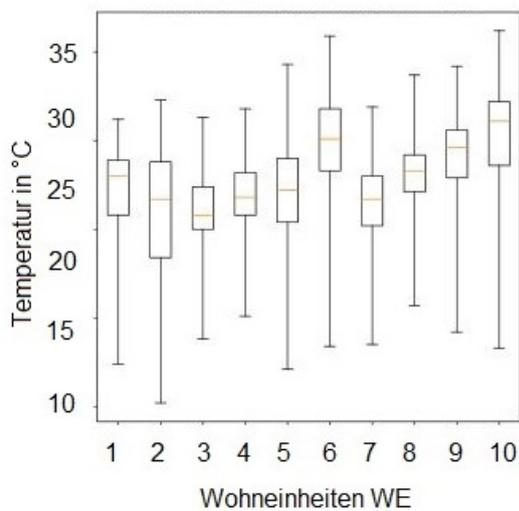


Abbildung 82 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Temperaturen für Haus 2 für den Zeitraum von 01.07.2016 bis 01.07.2017 (links im Bild Trinkkaltwasser, rechts im Bild Trinkwarmwasser)

In Haus 2 variieren die Temperaturverläufe weniger im Vergleich zu Haus 1, aufgrund der zentralen Trinkwassererwärmung.

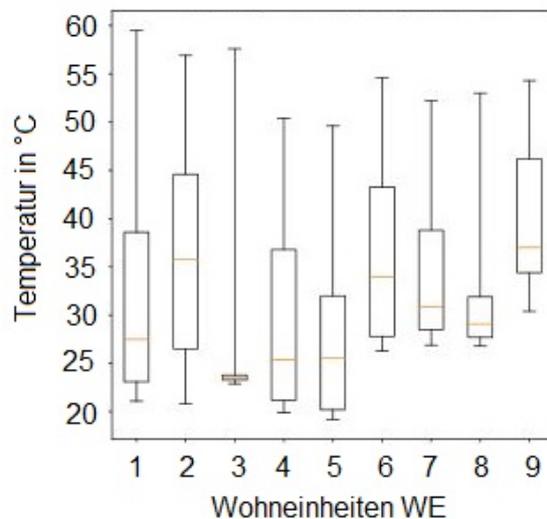
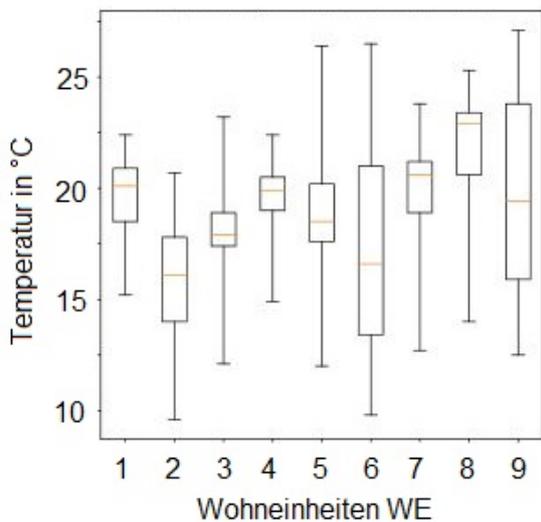


Abbildung 83 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Temperaturen für Haus 3 für den Zeitraum von 01.12.2017 bis 15.01.2018 (links im Bild Trinkkaltwasser, rechts im Bild Trinkwarmwasser)

Der Einbruch der Trinkwarmwassertemperatur ist auf die Abwesenheit mehrerer Nutzer über die Weihnachtsfeiertage zurückzuführen. Dies wirkt sich abschwächend auf die Temperaturwerte aus. In Haus 3 gibt es ähnliche Beobachtungen wie in Haus 2, da auch hier eine zentrale Trinkwassererwärmung installiert wurde. Die Temperaturprofile vieler Wohnungen sind ähnlich. Bei Wohnungen mit ähnlichem Nutzerverhalten werden Strangverluste sichtbar.

Auch in Haus 3 gibt es Wohnungen (z.B. WE 9) mit größerer Differenz zwischen minimaler Trinkwarmwasser- und maximaler Trinkkaltwassertemperatur.

Die eingestellte Maximaltemperatur der Brennwerttherme liegt bei 60 °C. Dies entspricht auch der maximalen Temperatur aller WE (bis auf einen Messfehler, siehe Haus 2, WE 2). Im Allgemeinen treten kurze Zapfvorgänge auf und darauf folgen längere Zeiten der Nichtnutzung, welche zu einer Aufwärmung bzw. Abkühlung führen. Die Temperaturmedianwerte bei Trinkkaltwasser sind recht hoch, wohingegen die für Trinkwarmwasser recht gering sind.

Gleichzeitigkeit

Die Gleichzeitigkeit berechnet sich über die Formel:

$$f_{GLF} = \frac{(\sum_{k=1}^n \dot{V}_k(t))_{\max}}{\sum_{k=1}^n \dot{V}_{k,nenn}} \quad k = 1 \dots n \text{ Abnehmer/WE}$$

Nach DIN 4708 ergibt sich für ein Haus mit 9 Wohnungen ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,32. Vergleichend dazu wurden für die Häuser 1 und 3 Gleichzeitigkeitsfaktoren nach obiger Formel berechnet (siehe Tabelle 26) die für Haus 2 geringfügig und für Haus 3 deutlich darunterliegen. Für ein Haus mit 10 Wohnungen wird der Gleichzeitigkeitsfaktor nach DIN 4708 mit 0,3 angegeben, wobei der für Haus 2 gemessene nur 0,2 beträgt.

Tabelle 27 Berechnete Gleichzeitigkeitsfaktoren mit der Annahme $\dot{V}_{k,nenn} = 10l/min$

	Haus 1	Haus 2	Haus 3
f_{GLF}	0,3	0,2	0,22

1.4.5.5 Elektroenergieverbrauch

Grundlagen

Seit 1990 wurde in Deutschland etwa ein Zehntel mehr Strom verbraucht [9]. Der langjährige Anstieg des Stromverbrauchs in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie privaten Haushalten hat sich in den letzten Jahren jedoch nicht fortgesetzt. Die Bundesregierung hat sich im Energiekonzept aus dem Jahr 2010 zum Ziel gesetzt, den Stromverbrauch bis zum Jahr 2020 um 10 Prozent (%) gegenüber 2008 zu senken. Um dies zu erreichen, wird für den Strombereich eine deutliche Effizienzsteigerung vorausgesetzt [5].

Die wichtigsten Maßnahmen in den Sektoren Haushalte und Kleinverbrauch sind die Einführung von Effizienzstandards für elektrische Geräte und energieverbrauchsrelevante Produkte im Rahmen der Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) sowie eine erweiterte Energieverbrauchskennzeichnung [5].

Der empfohlene Stromverbrauch pro Personenhaushalt ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** links dargestellt. Für 1 bis 2 Personenhaushalte wie sie in den betreffenden Sanierungsobjekten vorzufinden sind, sollte demnach der Stromverbrauch zwischen 1400 kWh (1 Personenhaushalt) und 2500 kWh (2 Personenhaushalt) liegen. Die Verteilung des Strombedarfs in Wohngebäuden ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** rechts dargestellt.

Empfohlener Stromverbrauch und Durchschnittswerte in Dt. (in kWh)

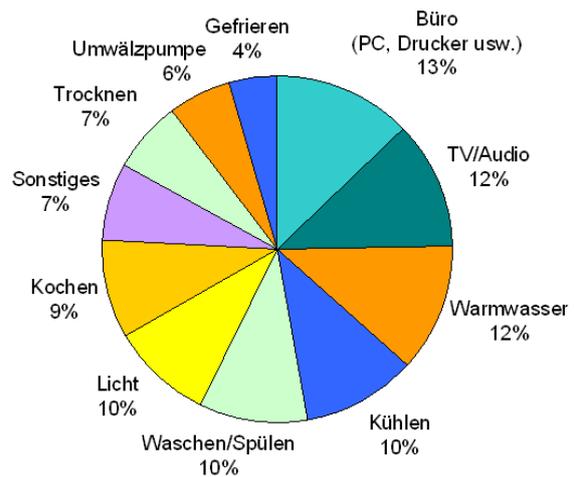
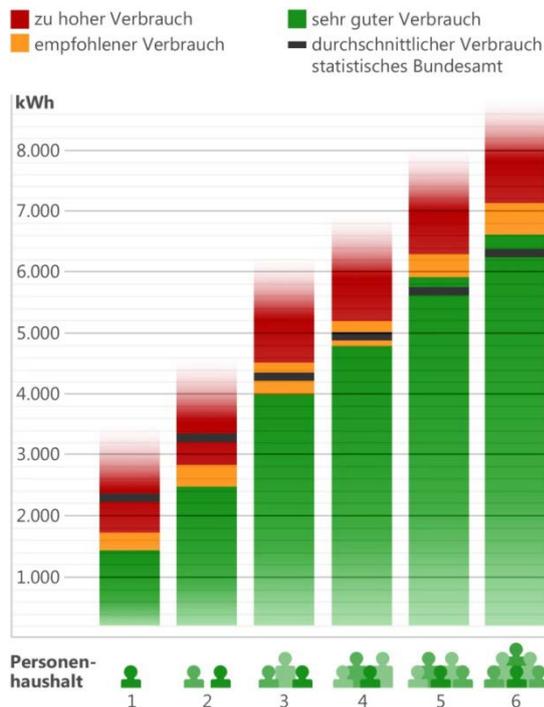


Abbildung 84 Links im Bild: Stromverbrauch und Durchschnittswerte in Deutschland (Quelle: destatis), rechts im Bild: Verteilung des Stromverbrauchs in privaten Haushalten, Ergebnisse einer Erhebung der Energieagentur NRW 2011 [8]

Der durchschnittliche Stromverbrauch je Wohnung liegt bei Gebäude 1 bei ca. 1.300 kWh/a. Aus Datenschutzgründen wird bei diesem Mittelwert nicht zwischen Personenhaushalten unterschieden. Als Ergebnis lässt sich jedoch festhalten, dass die Verbrauchswerte weit unter den empfohlenen Kennwerten der destatis-Erhebung liegen. Als Ursache kann hier die effiziente Beleuchtung (Zeitschaltregelung in Fluren und öffentlichen Räumen im Keller) bzw. LED Beleuchtungstechnik genannt werden. Auch legen die Bewohner Wert auf energieeffiziente Geräte. Eine Darstellung des Stromverbrauches in Haus 1 für das Jahr 2017 ist in der folgenden Abbildung enthalten.

Als gering ist der Stromverbrauch pro Wohnung in Gebäude 2 einzuordnen. Hier liegt der Mittelwert weit unter dem empfohlenen Richtwert für einen 1 Personenhaushalt. Auch hier kann als Ursache das Beleuchtungsmanagement und das Verhalten der Nutzer genannt werden.

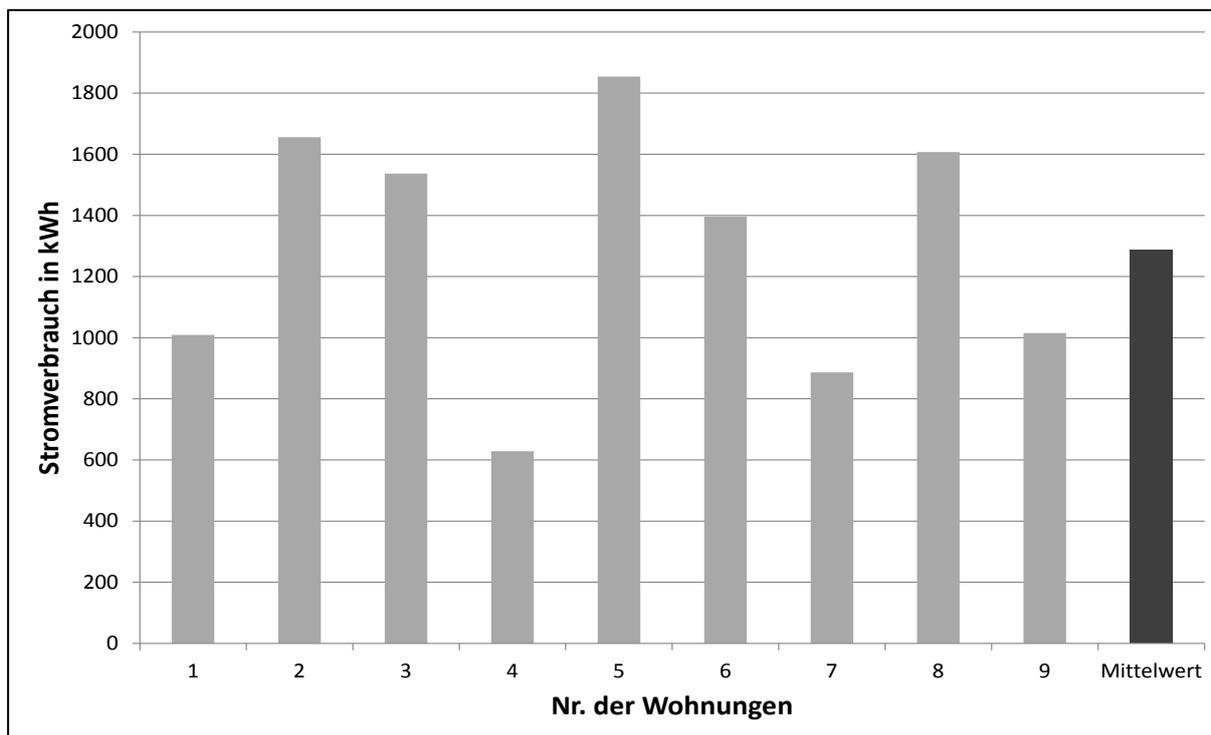


Abbildung 85 Stromverbrauch der einzelnen WE in Haus 1 im Vergleich zum Gebäudemittelwert

1.4.6 Analyse des Nutzerverhaltens

Nach der Sanierung von Gebäuden liegen die tatsächlich anfallenden Energieverbrauchs-werte oft über den im Vorfeld berechneten [6][7]. „Die Abweichung zwischen Energiebedarf und –verbrauch ist im Bestand umso größer je älter das Gebäude ist [7] “. Der sogenannte „Rebound-Effekt“ steht für eine Verhaltensänderung des Nutzers aufgrund einer technischen Steigerung der Energieeffizienz, die die ursprünglich positive Maßnahme kompensieren oder auch ins Gegenteil verkehren kann. Die Verantwortung des Energiesparens wird vom Nutzer auf die Technik übertragen.

Seitens der Nutzer wirkt eine Reihe von Einflüssen auf die tatsächlichen Verbrauchskenn-werte. Dazu zählen:

- die Belegungsdichte (Großfamilie vs. Single-Haushalt),
- die Belegungsdauer (Vollzeitbeschäftigung vs. Rentnerhaushalt) und
- die aktuelle Lebenssituation (Beispielsweise erzeugt ein Zusammenleben mit kleinen Kindern, älteren Menschen ein erhöhtes Wärmebedürfnis)

Das Energieverbrauchsverhalten der Nutzer ist Routineverhalten, das bedeutet, dass kogni-tive und emotionale Prozesse, die zu einer Änderung des Verhaltens führen würden, nicht mehr aktiv sind [6]. Eine Entsprechende Änderung kann durch Wirksamkeitsüberzeugung und die Vermittlung einer Kosten-Nutzen-Überzeugung bewirkt werden.

1.5 Bewertung der Sanierungsmaßnahmen und Vergleich von Aufwand und Nutzen energetischer Sanierungsoptionen

1.5.1 Grundlagen

Zum Vergleich der Anlagentechnik der Gebäude wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt und Jahresgesamtkosten definiert. Für jedes Gebäude wurden folgende Kosten ermittelt:

$$K_{ges} = K_a + K_{WBI} + K_{BS} \quad \text{Gl. 1.5.1-1}$$

K_{WBI} = Kosten für Wartung und Betrieb

K_{BS} = Brennstoffkosten für Heizanlage

K_a = Jahreskapitalkosten

mit $K_a = I_0 * a$ Gl. 1.5.1-2

I_0 = Investitionskosten

a = Annuitätsfaktor

$$a = \frac{q^n * (q - 1)}{q^n - 1} \quad \text{Gl. 1.5.1-3}$$

q = Zinsfaktor

n = Nutzungsdauer

$$q = 1 + i \quad \text{Gl. 1.5.1-4}$$

i = Zinssatz

1.5.2 Betrachtung Gebäude 1

Zu Beginn der Untersuchung wurden sämtliche für die Wirtschaftlichkeitsberechnung notwendigen Kosten ermittelt. Für eine einheitliche Bewertung wurden die Investitionskosten in 4 Bereiche unterteilt:

- Heizungstechnik
- Lüftung
- Dokumentation
- Lohnkosten

Das Ergebnis der Kostenermittlung ist in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt. Dabei enthält Tabelle 28 die Zusammenstellung der Investitionen, Tabelle 29 die Wartungs- und Betriebskosten, 0 die Angaben zum Energieverbrauch und Tabelle 31 allgemeine Kenngrößen.

Nach Ermittlung der nachstehend zusammengestellten Eingangsgrößen wurde nach VDI 2067 eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 86 und in Tabelle 32 dargestellt. Es ergibt sich demnach ein spezifischer Wärmepreis von 30 ct/kWh.

Tabelle 28 Investitionskosten Gebäude 1

Investitionskosten		
Heizungstechnik	EUR	96.274,26
Hausanschluss, Armaturen und Zubehör	EUR	9.595,51
Frischwasserstationen	EUR	30.448,46
Rohrleitung und Zubehör	EUR	5.486,73
Isolierung	EUR	4.629,85
Flächenheizung	EUR	46.113,71
Lüftung	EUR	54.916,75
KWL	EUR	48.288,59
Luftleitung und Zubehör	EUR	6.628,16
Lohnkosten	EUR	2.885,75
Dokumentation	EUR	773,50
Gesamt	EUR	154.850,26

Tabelle 29 Kosten für Wartung und Betrieb Gebäude 1

Wartungs- und Betriebskosten		
Wartungskosten	EUR	212,20
Schornsteinfeger	EUR	115,76
Heiznebenkosten	EUR	193,02

Tabelle 30 Energieverbrauch

Wartungs- und Betriebskosten		
Energieverbrauch Heizung und Trinkwassererwärmung	kWh/a	61.749
Beheizte Wohnfläche	m ²	635,92
Spezifischer Energieverbrauch HZ + TWE	kWh/m ² a	97,10
Brennstoffpreis	Ct/kWh _{Brennstoff}	0,06568

Tabelle 31 Allgemeine Kenngrößen

Allgemeine Kenngrößen		
Nutzungsdauer	n	15
Interner Zinsfluss	i	4
Zinsfaktor		1,04
Annuitätsfaktor		0,0899

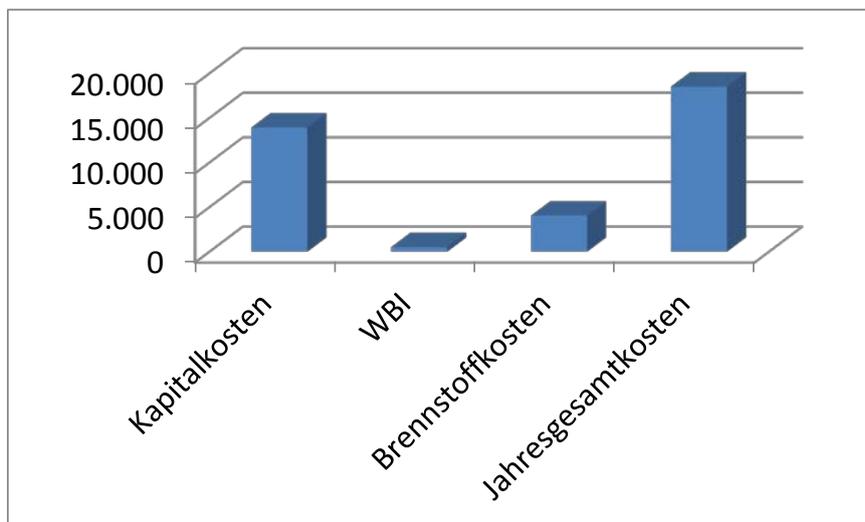


Abbildung 86 Jahreskosten nach VDI 2067 für Gebäude 1

Tabelle 32 Zusammenfassung der Jahreskosten für Gebäude 1

Kostenvergleichsrechnung nach VDI 2067		
Kapitalkosten	EUR/a	13.927
WBI	EUR/a	522,98
Brennstoffkosten	EUR/a	4.056
Jahresgesamtkosten	EUR/a	18.506
Spezifische Kosten	EUR/kWh_{th}	0,30

1.5.3 Betrachtung Gebäude 2

Für Gebäude 2 wurde analog zur Vorgehensweise in Gebäude 1 die Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Die Eingangsdaten sowie das Berechnungsergebnis sind in den folgenden Tabellen zusammengetragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 87 und Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 33 Investitionskosten Gebäude 2

Investitionskosten		
Heizungstechnik	EUR	48.492,87
Armaturen Rohrleitung und Zubehör	EUR	12.709,75
Heizgerät und Zubehör	EUR	14.894,48
Isolierung	EUR	3.406,43
Raumheizflächen	EUR	17.482,21
Lüftung	EUR	14.721,45
KWL	EUR	14.721,45
Lohnkosten	EUR	2.885,75
Dokumentation	EUR	773,50
Gesamt	EUR	66.873,57

Tabelle 34 Kosten für Wartung und Betrieb Gebäude 2

Wartungs- und Betriebskosten		
Wartungskosten	EUR	214,20
Schornsteinfeger	EUR	269,20
Heiznebenkosten	EUR	104,42

Tabelle 35 Energieverbrauch

Wartungs- und Betriebskosten		
Energieverbrauch Heizung und Trinkwassererwärmung	kWh/a	69.828
Beheizte Wohnfläche	m ²	535,33
Spezifischer Energieverbrauch HZ + TWE	kWh/m ² a	130,44
Brennstoffpreis	Ct/kWh _{Brennstoff}	0,06158

Tabelle 36 Allgemeine Kenngrößen

Allgemeine Kenngrößen		
Nutzungsdauer	n	15
Interner Zinsfluss	i	4
Zinsfaktor		1,04
Annuitätsfaktor		0,0899

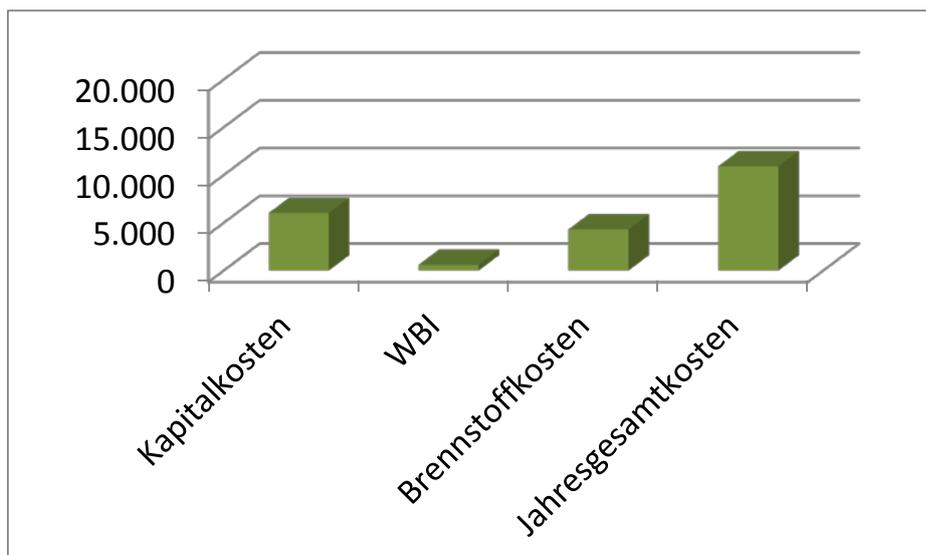


Abbildung 87 Jahreskosten nach VDI 2067 für Gebäude 2

Tabelle 37 Zusammenfassung der Jahreskosten für Gebäude 2

Kostenvergleichsrechnung nach VDI 2067		
Kapitalkosten	EUR/a	6.015
WBI	EUR/a	587,82
Brennstoffkosten	EUR/a	4.300
Jahresgesamtkosten	EUR/a	10.902
Spezifische Kosten	EUR/kWh_{th}	0,16

1.5.4 Monetäre Gegenüberstellung und Bewertung

Vergleicht man den spezifischen Wärmepreis beider Sanierungsvarianten miteinander, so ergibt sich eine erhebliche Diskrepanz zwischen finanziellen Aufwand und Nutzen. Die hohen Investitionskosten der Anlagentechnik erbringen keine wirtschaftlich vertretbare Effizienzsteigerung. Bei identisch durchgeführten Sanierungsmaßnahmen ergibt sich durch die in Gebäude 1 aufwendigerer Anlagentechnik kein monetärer und ökologischer Nutzen.

1.6 Wissenstransfer in die Praxis

1.6.1 Bereitstellung von Daten für die Verwendung durch Simulationstools

1.6.1.1 Bauteilsimulation

Die erfassten bauteilbezogenen Datensätze werden allgemein verwendbar aufbereitet und stehen als Testszenarien für die Validierung und Weiterentwicklung von Softwarelösungen auf dem Gebiet der instationären hygrothermischen Bauteilsimulation (DELPHIN, Wufi etc.) zur Verfügung.

1.6.1.2 Gebäudesimulation

Die erfassten gebäudebezogenen Datensätze werden anonymisiert, allgemein verwendbar aufbereitet und dokumentiert. Sie stehen als Testszenarien für die Validierung und Weiterentwicklung von Softwarelösungen auf dem Gebiet der instationären Gebäudesimulation (energiePlus, NANDRAD / BIM HVACTool, THERAKLES) zur Verfügung.

1.6.2 Übergabe der Daten an die Begleitforschung

Die Daten werden nach Vorgabe des BMWi / PtJ in aufbereiteter und anonymisierter Form an die Begleitforschung übergeben. Eine Herausgabe der sensiblen Rohdaten ist prinzipiell möglich, erfordert jedoch den vorherigen Abschluss einer entsprechenden Geheimhaltungserklärung.

1.6.3 Verwendung der Daten als Diskussionsgrundlage in der Normung

Die Ergebnisse des Monitoring-Projektes werden durch die beteiligten Institute in die einschlägigen Normungsgremien eingebracht und stehen somit als Diskussionsgrundlage für die künftige Festlegung von Randbedingungen, Parametern etc. zur Verfügung

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Positionen sind vollständig im zahlenmäßigen Verwendungsnachweis aufgeführt und entsprechend erläutert. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Mittelverteilung gemäß Zuwendungsbescheid und deren Verwendung.

Tabelle 38 Übersicht Mittelverwendung

Position	Summe gemäß Zuwendungsbescheid [EUR]	Summe gemäß Verwendungsnachweis [EUR]
812	326.665,00	369.870,67
822	9.208,00	2.250,24
834	2.700,00	1.139,73
835	18.200,00	18.200,00
843	5.500,00	5.256,11
846	11.020,00	8.934,83
850	45.674,00	16.425,54
Summe	418967,00	422.077,12

Insgesamt wurden ca. 13 % des Gesamtbudgets zu Personalmitteln umgewidmet, was durch Einsparungen in anderen Bereichen möglich wurde. Sie ermöglichten unter anderem die Entwicklung zusätzlicher Auswertungsalgorithmen / Datenverarbeitungsansätze für vergleichsweise große Datenbestände sowie die Fortführung der Messungen und deren Auswertung im Rahmen der kostenneutralen Laufzeitverlängerung gem. Änderungsbescheid vom 21. Juli 2017.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die technischen Möglichkeiten (Hardware und Software) zur umfassenden Bewertung von Bauwerken und konstruktiven Details sowie Anlagenkomponenten hinsichtlich ihrer energetischen Eigenschaften und Performance haben sich in den zurückliegenden Jahren immer weiter verbessert. So können beispielsweise mittels spezieller Tools zu Building-Information-Modelling (BIM) komplette Gebäude bis in das feinste Detail modellhaft abgebildet werden. Auch die äußeren Klimarandbedingungen können auf der Grundlage der verfügbaren Klimadaten des DWD durch weitere Verarbeitung als Prognose- und Randbedingungen ideal abgebildet werden.

Eine Datengrundlage zur Beschreibung des Nutzerverhalten – insbesondere im Bereich der Wohngebäude – existiert hingegen nur für ausgewählte Einzelfälle (einzelne Wohnungen oder gar nur Räume).

Mit dem Vorhaben IMoSUB wurde ein ausgesprochen umfassender Ansatz für ein komplexes Monitoring umgesetzt. Dabei erfolgte die Erfassung

- der Raumklimadaten in allen Räumen der betrachteten Gebäude,
- der Lüftungsaktivitäten der Bewohner,
- der Warm- und Kaltwasserverbrauchsdaten sämtlicher Zapfstellen,
- der Wärmeverbrauch sämtlicher in den Gebäuden befindlicher Wohneinheiten,
- der Gasverbrauch der Heizzentralen,
- der Elektroenergieverbrauchswerte aller Wohneinheiten sowie
- des Außenklimas an zwei unterschiedlich ausgerichteten Fassaden.

Die Datenerfassung erfolgte auf einer vergleichsweise homogenen Hardwareplattform und mit einer eigens dafür entwickelten Softwarelösung, so dass die Verschneidung der Daten auf einem hohen Level möglich ist. Die eingesetzten Lösungen erlaubten extrem hohe Abtastraten (teils bis zu 30-Sekunden-Intervalle), welche auch in weiterführenden Forschungsaktivitäten sehr differenzierte Einzelauswertungen zur Analyse spezieller Fragestellungen ermöglichen.

Im Ergebnis des Projektes liegt eine umfassende Datenbasis zur Validierung von Simulationen und Modellen vor, die – insbesondere im Hinblick auf das Nutzerverhalten – über eine ausgezeichnete Qualität verfügt.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Bei den Projektergebnissen handelt es sich im Wesentlichen um Messdaten, deren Auswertungsergebnisse und abgeleiteten Aussagen zum Nutzerverhalten sowie zur Anlagenperformance und zum hygrothermischen Verhalten konstruktiver Details an innengedämmten Konstruktionen. Direkte - wirtschaftliche Aussichten lassen sich daher nur bedingt ableiten – der Hauptnutzen des Projektes liegt im wissenschaftlichen Bereich (siehe folgender Abschnitt).

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Vorbereitung, den Aufbau und die Durchführung komplexer Monitoring-Projekte unter Einsatz von vergleichsweise kostengünstiger Hardware in Verbindung mit eigenen speziell angepassten Softwarelösungen werden unmittelbar in Folgeprojekte übertragen und dort genutzt bzw. weiterentwickelt. Sie können von weiteren Forschungseinrichtungen übernommen werden – im Bedarfsfall kann ebenso eine Systemberatung zur Nachnutzung des gewonnenen know how angeboten werden.

4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Bei dem vorliegenden Vorhaben standen die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten im Vordergrund. Die Ergebnisse finden in Form von Lastannahmen und Randbedingungen direkten Eingang in laufende und künftige Vorhaben - speziell zur Neu- und Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen

- zur komplexen Gebäudesimulation
- zur numerischen instationären Bauteilsimulation sowie
- zur Simulation von Versorgungsstrukturen und -netzen.

Die getroffenen Aussagen wurden so aufbereitet, dass sie als Grundlagen für die Planung und Umsetzung energetischer Sanierungsvorhaben am einzelnen Bestandsgebäude - insbesondere unter Denkmalschutzaspekten - und ganzer Stadtquartiere anwendbar werden.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist in mehreren F&E-Feldern gegeben:

- Nutzung der erfassten Daten als Eingangsgrößen für Simulationsrechnungen (Gebäudesimulation, Bauteilsimulation, Simulation von Versorgungsnetzen)
- Verstärkung der bundesweiten Datenbasis für die genannten Datenarten

- Erstellung von Nutzerprofilen (Leistungen, Volumenströme Temperaturen) für die Gebäudesimulation sowie zur energetischen und exergetischen Optimierung
- Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Fortschreibung von Normen, Bewertungsrichtlinien und –verfahren

Die Verwertbarkeit und Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse wird durch eine umfassende Dokumentation und die digitale Bereitstellung der Daten für nachfolgende Forschungsvorhaben gesichert.

II.5 Fortschritt Dritter während der Laufzeit

Das Vorhaben IMoSUB ist im Forschungsbereich Energie in Gebäuden und Quartieren angesiedelt und unterliegt daher den Vorgaben der Wissenschaftlichen Begleitforschung (BF) ENERGIEWENDEBAUEN. Das interdisziplinär aufgestellte Forschungsteam erarbeitet permanent einen Überblick über den Fortschritt und die erzielten Ergebnisse aller angeschlossenen Vorhaben. Daher erübrigt sich eine umfassende Schilderung des Fortschritts Dritter während der Projektlaufzeit im Rahmen dieses Schlussberichts.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Oberseminar, **Messdatenbasierte Analyse der Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs in Wohngebäuden**, Charlotte Rohrbeck, Präsentation 24.08.2017

Oberseminar, **Messdatenbasierte Analyse der Gleichzeitigkeit des Trinkwasserverbrauchs in Mehrfamilienhäusern**, Hannah Krüger, Präsentation 16.07.2018

Oberseminar, **Messdatenbasierte Analyse des Trinkwarmwasserverbrauchs am Beispiel eines Mehrfamilienhauses**, Jinyu Zhou, Präsentation geplant

III. Anlage (1) – Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Innerhalb der Forschung für energieoptimiertes Bauen EnOB ordnet sich das Vorhaben als wissenschaftliches Begleitprojekt (Monitoring) eines innovativen Pilotvorhabens in den Forschungsschwerpunkt drei ein. Es beinhaltet ein Langzeit-Monitoring, die entsprechende Dokumentation und Auswertung sowie Analyse der erfassten Daten.

Ein Alleinstellungsmerkmal für die Einordnung des Projektes in das Projektumfeld der EnOB-geförderten Vorhaben ergibt sich aus der Kombination der besonderen Randbedingungen:

- Es handelt sich um ein Sanierungsvorhaben mit erhöhten Anforderungen durch den Denkmalschutz und eine barrierefreie Gestaltung.
- Es wurden baugleiche Gebäude an einem Standort mit grundverschiedenen Sanierungsansätzen insbesondere im Bereich der TGA saniert.
- Es erfolgte eine integrierte Betrachtung von Verbrauch, Nutzerverhalten und Bauteilperformance.

Damit agiert das Projekt in Bezug auf den EnOB-Gesamtkontext an der Schnittstelle zwischen „Demonstration beispielhafter Sanierungen“ und „Monitoring, Betriebsoptimierung und Datenbank“. Insbesondere im Hinblick auf die Dimensionierung von Versorgungsstrukturen (Wärmeerzeuger, Netzgestaltung etc.) hat das Projekt zur Verbesserung der Datenbasis in einer neuen Qualität beigetragen.

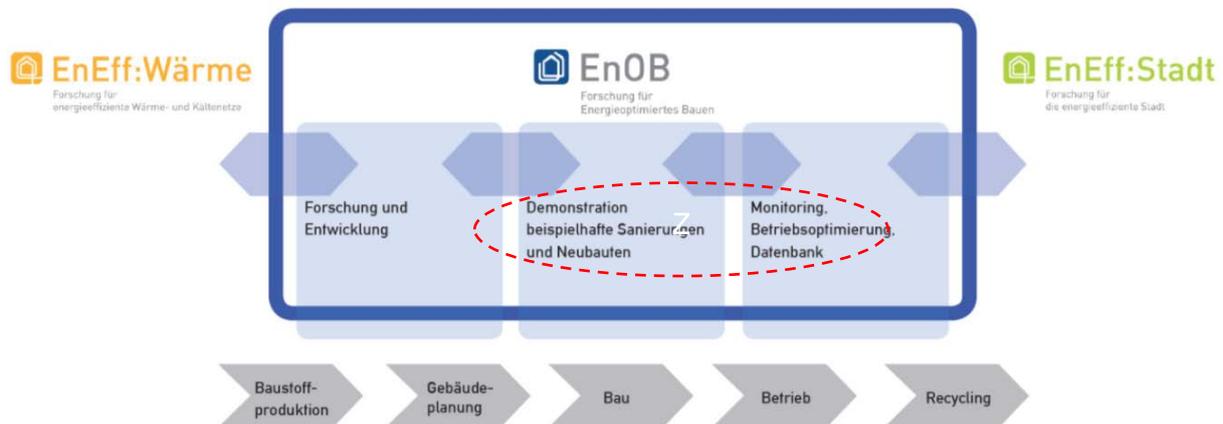


Abbildung 88 Energieforschung entlang der Wertschöpfungskette (Quelle: „Forschung für Energieoptimiertes Bauen – EnOB“. BMWi, September 2012)

III.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens / erreichte Nebenergebnisse / wesentliche Erfahrungen

Im Rahmen des Projektes erfolgte über einen Zeitraum von zwei Jahren (01/2016 – 12/2017) eine umfassende Analyse des energetischen Gebäudeverhaltens, der Anlagenperformance und des Nutzerverhaltens in drei Mehrfamilienhäusern gleicher Bauart. Insgesamt waren 28 Wohneinheiten in das Messkonzept eingebunden. Erfasst wurden:

- der Raumklimadaten in allen Räumen der betrachteten Gebäude,
- der Lüftungsaktivitäten der Bewohner,
- der Warm- und Kaltwasserverbrauchsdaten sämtlicher Zapfstellen,
- der Wärmeverbrauch sämtlicher in den Gebäuden befindlicher Wohneinheiten,
- der Gasverbrauch der Heizzentralen,
- der Elektroenergieverbrauchswerte aller Wohneinheiten sowie
- des Außenklimas an zwei unterschiedlich ausgerichteten Fassaden.

Die erfassten Daten wurden für weiterführende Forschungsvorhaben aufbereitet und dienen insbesondere als Eingangs- und Kalibriergrößen für vorhandene und in (Weiter-) Entwicklung befindliche Softwaretools, sowie als Grundlage für die Beschreibung des Nutzerverhaltens und der sich daraus ergebenden Nutzungsrandbedingungen für normative Überlegungen.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Der Verwertungsplan, sowie seine Fortschreibung sind im Schlussbericht in Abschnitt II.4 dargestellt.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine

III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer der Projektergebnisse

Da sich das Projekt mit dem Monitoring bewohnter Gebäude beschäftigt, genießen die Belange des Datenschutzes eine hohe Priorität. Die erhobenen Daten werden durch die bear-

beitenden Institute für die wissenschaftliche Arbeit genutzt und der Wissenschaftlichen Begleitforschung ENERGIEWENDE BAUEN bereitgestellt. Nachdem dort die ggf. weitere notwendige Anonymisierung vorgenommen wurde, kann in Verantwortung der Begleitforschung oder des PtJ die Weitergabe an fachlich qualifizierte Forschungseinrichtungen erfolgen. Eine öffentlich zugängliche Präsentation ist hingegen nicht vorgesehen.

III.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Ausgaben- und Zeitplanung wurde eingehalten. Die beantragte und bewilligte kostenneutrale Laufzeitverlängerung von zwei Monaten bis zum 31.12.2017 ermöglichte die Erhebung der Daten über vollständige zwei Jahre und somit eine Stärkung der erarbeiteten Datenbasis.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1 Lageplan der Gebäude im Untersuchungsgebiet
- Abbildung 2 Ansichten der Gebäude vor und nach der Sanierung
- Abbildung 3 Gebäude 1, Prinzipschaltbild Heizzentrale
- Abbildung 4 Brennwert-Kessel (links) mit Pufferspeicher (rechts)
- Abbildung 5 Ansicht der Wohnungsanschlusstation
- Abbildung 6 Gebäude 2, Prinzipschaltbild Heizzentrale
- Abbildung 7 Frischwassermodul in der Heizzentrale – rechts im Bild mit abgenommener Verkleidung
- Abbildung 8 Gebäude 3, Prinzipschaltbild Heizzentrale
- Abbildung 9 Brennwertgerät mit Pufferspeicher (links) sowie Wärmeübertrager (rechts im Bild)
- Abbildung 10 Wärmemengenzähler in der Heizzentrale (links oben), Warm und Kaltwasserzähler in Einbausituation (rechts oben), Stromzähler mit aufgesetztem M-Bus-Modul (links unten), Gaszähler mit montiertem M-Bus-Modul (rechts unten)
- Abbildung 11 DHT22-Sensor (links), 1wire-Sensor mit Anschlusskabel (Mitte) und Reed-Kontakt (Beispiel rechts)
- Abbildung 12 BTM-Datenlogger (links) sowie Netzwerkverteiler (RS422/485) (rechts)
- Abbildung 13 Ansicht des WEC mit angeschlossenen Testsensoren zur Prüfung der Funktionstüchtigkeit
- Abbildung 14 Prinzipskizze zur Anbindung der Raumklimasensoren an den WEC
- Abbildung 15 Anschluss der Fensterkontakte via MCP3008 an den EPC
- Abbildung 16 Schematischer Aufbau M-Bus-Netz
- Abbildung 17 Prinzipschaltbild und Foto einer installierten Monitoring-Zentrale
- Abbildung 18 Ausschnitt aus der Struktur zur Ablage der Daten auf dem TU-Server der TUD
- Abbildung 19 Flussdiagramm zur Datenplausibilisierung
- Abbildung 20 Ergebnis der Überprüfung ausgewählter 1Wire-Sensoren
- Abbildung 21 Zeitlicher Verlauf einer 1Wire-Kalibrierkurve
- Abbildung 22 Vergleich der Messwerte ausgewählter Raumklimafühler
- Abbildung 23 Ebenen-Modell Workflow zur Datenverarbeitung M-Bus-Daten

- Abbildung 24 Ebenen-Modell Workflow zur Datenverarbeitung Raumklima-Daten
- Abbildung 25 Heizwärmeverbrauch Haus 1 – Zeitraum 12/2015 – 04/2018
- Abbildung 26 Heizwärmeverbrauch Haus 2 – Zeitraum 01/2016 – 04/2018
- Abbildung 27 Heizwärmeverbrauch Haus 3 – Zeitraum 03/2016 – 04/2018
- Abbildung 28 Elektroenergieverbrauch Haus 1 – Zeitraum 03/2016 – 04/2018
- Abbildung 29 Elektroenergieverbrauch Haus 2 – Zeitraum 06/2016 – 04/2018
- Abbildung 30 Elektroenergieverbrauch Haus 3 – Zeitraum 06/2016 – 04/2018
- Abbildung 31 Kaltwasserverbrauch Haus 1
- Abbildung 32 Warmwasserverbrauch Haus 1
- Abbildung 33 Kaltwasserverbrauch Haus 2
- Abbildung 34 Warmwasserverbrauch Haus 2
- Abbildung 35 Kaltwasserverbrauch Haus 3
- Abbildung 36 Warmwasserverbrauch Haus 3
- Abbildung 37 Prüfmatrix zur Validierung der erhobenen Trinkwassertemperaturen (Ausschnitt)
- Abbildung 38 Beispiel: Tagesganglinie Trinkwassertemperaturen
- Abbildung 39 Beispiel für die Darstellung der Raumklimata in zwei ausgewählten Räumen
- Abbildung 40 Erfasste Temperaturen im Bereich der Nordfassade
- Abbildung 41 Relative Luftfeuchten im Bereich der Nordfassade
- Abbildung 42 Taupunkttemperaturen im Bereich der Nordfassade
- Abbildung 43 Gemessener Luftdruck im Bereich der Nordfassade
- Abbildung 44 Prinzipskizze einer Bauteilmessstrecke
- Abbildung 45 Messwerte im Bereich der ungestörten Wand
- Abbildung 46 Messwerte im Bereich der Wandecke
- Abbildung 47 Messwerte im Bereich der Fensterlaibung
- Abbildung 48 Messwerte im Bereich des Fenstersturzes
- Abbildung 49 Vergleich der Oberflächentemperaturen auf den raumseitigen Wandoberflächen
- Abbildung 50 Oberflächentemperaturen auf der Fensterlaibung
- Abbildung 51 Wärmestrom vom Raum in die Außenwandkonstruktion
- Abbildung 52 Auszug aus der DIN EN 15026, Anhang C – Raumseitige Randbedingungen

- Abbildung 53 Absoluter Wassergehalt in der Raumluft über der Außenlufttemperatur
- Abbildung 54 Wassergehalt in der Raumluft über der Außenlufttemperatur - Einzelwerte
- Abbildung 55 Mittlere Wassergehalte in der Raumluft über der Außenluft – Beispiel
- Abbildung 56 Feuchtelast als Resultat von Feuchteeintrag und Austausch mit der Außenluft
- Abbildung 57 Wärmeverbrauch 2017 monatlich bezogen auf die Grundfläche – Haus 1
- Abbildung 58 Wärmeverbrauch 2017 monatlich bezogen auf die Grundfläche – Haus 2
- Abbildung 59 Wärmeverbrauch 2017 monatlich bezogen auf die Grundfläche – Haus 3
- Abbildung 60 Vergleich der flächennormierten monatsbezogenen Heizenergie-Verbrauchswerte für die betrachteten Gebäude (Basis: Wohnfläche)
- Abbildung 61 Vergleich der flächennormierten monatsbezogenen Heizenergie-Verbrauchswerte für die betrachteten Gebäude (Basis: Wohnfläche) – um Trinkwassererwärmung bereinigt
- Abbildung 62 Vergleich der berechneten Transmissionswärmeverluste mit den verbrauchten Wärmemengen – Beispiel 1
- Abbildung 63 Vergleich der berechneten Transmissionswärmeverluste mit den verbrauchten Wärmemengen – Beispiel 2
- Abbildung 64 Zwei ausgewählte Beispiele für die Erstausswertung des Fensteröffnungsstatus
- Abbildung 65 Monatliche Summen der Fensteröffnungsminuten - Beispielgrafik
- Abbildung 66 Kalkulationsschema Geschosslage der WE
- Abbildung 67 Schematische Darstellung der Gebäudeausrichtung (unter anderem Eingangsparemeter für die Berechnung von Verschattung und solaren Gewinnen bei der Gebäudesimulation)
- Abbildung 68 Beispiel für den Tagesverlauf des Heizenergieverbrauchs (links an einem Wochentag, rechts im Bild der Tag an einem Wochenende)
- Abbildung 69 Ablaufplan zur Ermittlung der Gleichzeitigkeitsfaktoren am Beispiel Haus 1
- Abbildung 70 Box Plot
- Abbildung 71 Über Kombinatorik ermittelte theoretische Bandbreite der Gleichzeitigkeitsfaktoren RH und TWE für Haus 1 (Gruppengröße = Anzahl der WE)
- Abbildung 72 Über Kombinatorik ermittelte theoretische Bandbreite der Gleichzeitigkeitsfaktoren RH für Haus 2 (Gruppengröße = Anzahl der WE)
- Abbildung 73 Theoretisch über Näherungsfunktion ermittelte Gleichzeitigkeitsfaktoren (Haus 1 = RH + TWE; Haus 2 = RH; Gesamt = Mischung aus allen Abnehmer Haus 1 und 2)

- Abbildung 74 Rücklauftemperaturen aus WE 07 in Haus 1
- Abbildung 75 Rücklauftemperaturen aus WE 03 in Haus 2
- Abbildung 76 Wasserverbrauch Haus 1 (links im Bild Trinkwarmwasser, rechts im Bild der Kaltwasserverbrauch)
- Abbildung 77 Wasserverbrauch Haus 1 (links im Bild Trinkwarmwasser, rechts im Bild der Kaltwasserverbrauch)
- Abbildung 78 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkwasserverbräuche für jede einzelne WE im Haus 1 für den Zeitraum von 01.03.2016 bis 28.09.2016
- Abbildung 79 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkwasserverbräuche für jede einzelne WE im Haus 1 für den Zeitraum von 01.07.2016 bis 01.07.2017
- Abbildung 80 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Trinkwasserverbräuche für jede einzelne WE im Haus 3 für den Zeitraum von 01.12.2017 bis 15.01.2018
- Abbildung 81 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Temperaturen für Haus 1 für den Zeitraum von 01.03.2016 bis 28.09.2016 (links im Bild Trinkkaltwasser, rechts im Bild Trinkwarmwasser)
- Abbildung 82 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Temperaturen für Haus 2 für den Zeitraum von 01.07.2016 bis 01.07.2017 (links im Bild Trinkkaltwasser, rechts im Bild Trinkwarmwasser)
- Abbildung 83 Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Temperaturen für Haus 3 für den Zeitraum von 01.12.2017 bis 15.01.2018 (links im Bild Trinkkaltwasser, rechts im Bild Trinkwarmwasser)
- Abbildung 84 Links im Bild: Stromverbrauch und Durchschnittswerte in Deutschland (Quelle: destatis), rechts im Bild: Verteilung des Stromverbrauchs in privaten Haushalten, Ergebnisse einer Erhebung der Energieagentur NRW 2011 [8]
- Abbildung 85 Stromverbrauch der einzelnen WE in Haus 1 im Vergleich zum Gebäudemittelwert
- Abbildung 86 Jahreskosten nach VDI 2067 für Gebäude 1
- Abbildung 87 Jahreskosten nach VDI 2067 für Gebäude 2

Anlagenverzeichnis

*Sämtliche Anlagen enthalten sensible Daten und werden aus diesem Grund als **VERTRAULICH** gekennzeichnet.*

Anlage V-01	Gebäudeplan Haus 1
Anlage V-02	Gebäudeplan Haus 2
Anlage V-03	Gebäudeplan Haus 3
Anlage V-04	Sensorlisten und Codierungen
Anlage V-05.1	Erfasste Innenklimadaten Haus 1
Anlage V-05.2	Erfasste Innenklimadaten Haus 2
Anlage V-05.3	Erfasste Innenklimadaten Haus 3
Anlage V-06.1	Erfasste Bauteilmonitoring-Daten Haus 1
Anlage V-06.2	Erfasste Bauteilmonitoring-Daten Haus 2
Anlage V-06.3	Erfasste Bauteilmonitoring-Daten Haus 3
Anlage V-07.1	Raumluftwassergehalte Haus 1
Anlage V-07.2	Raumluftwassergehalte Haus 2
Anlage V-07.3	Raumluftwassergehalte Haus 3
Anlage V-08.1	Berechnete Transmissionswärmeverluste und Heizenergieverbrauchswerte Haus 1
Anlage V-08.2	Berechnete Transmissionswärmeverluste und Heizenergieverbrauchswerte Haus 2
Anlage V-08.3	Berechnete Transmissionswärmeverluste und Heizenergieverbrauchswerte Haus 3
Anlage V-09.1	Fensteröffnungsstatusdaten Haus 1 - Rohdaten
Anlage V-09.2	Fensteröffnungsstatusdaten Haus 2 - Rohdaten
Anlage V-09.3	Fensteröffnungsstatusdaten Haus 3 - Rohdaten
Anlage V-10.1	Fensteröffnungsstatusdauer Haus 1
Anlage V-10.2	Fensteröffnungsstatusdauer Haus 2
Anlage V-10.3	Fensteröffnungsstatusdauer Haus 3
Anlage V-11.1	Häufigkeitsverteilung ausgewählter Rücklauftemperaturen Haus 1
Anlage V-11.2	Häufigkeitsverteilung ausgewählter Rücklauftemperaturen Haus 2

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 277-1, Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen – Teil 1: Hochbau
- [2] DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
- [3] DIN EN 15026, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007
- [4] EnEV 2014
- [5] Saena, B. Energetische Sanierung - Ein Praxisleitfaden zur Gebäudehülle: SAENA Sächsische Energieagentur GmbH, Dresden, 2017.
- [6] Hacke, U. Nutzerverhalten im Mietwohnbereich. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2009.
- [7] Schneider, B. Nutzerverhalten bei Sanierungen berücksichtigen. Karlsruhe: BINE Informationsdienst, Leibnitzinstitut für Informationsinfrastruktur GmbH, 2015.
- [8] NRW Energieagentur - Wo bleibt der Strom? NRW Energieagentur GmbH, Düsseldorf, 2011
- [9] Rehau: Gleichzeitigkeit - der unterschätzte Faktor. In: Sonderdruck aus BWK 12-2012

Liste der verwendeten Abkürzungen

BTMC Bauteilmonitoring-Controller

ELT Elektro

EPC Einplatinen-Computer (Raspberry B+)

GPIO General Purpose Input/Output

HA Hausanschluss

IBK Institut für Bauklimatik

IET Institut für Energietechnik

MAG Membranausdehnungsgefäß

OWFS 1wire-Filesystem

TGA Technische Gebäudeausrüstung

TW Trinkwasser

UWP Umwälzpumpe

WE Wohneinheit

