

**Messdatengestützte Analyse und Interpretation
sanierungsbedingter Effizienzsteigerungen im Wohnungsbau**

Von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dortmund genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Tanja Osterhage

1. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems
2. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller
Tag der Einreichung:	22. Januar 2018
Tag der mündlichen Prüfung:	13. April 2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie.

Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb-nb.de> abrufbar.

D 290 (Diss., Technische Universität Dortmund, 2018)

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker

Direktor E.ON Energy Research Center

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)

E.ON Energy Research Center

Mathieustraße 10

52074 Aachen

E.ON Energy Research Center | 58. Ausgabe der Serie

EBC | Energy Efficient Buildings and Indoor Climate

Copyright Tanja Osterhage

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN: 978-3-942789-57-8

1. Auflage 2018

Verlag:

E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University

Mathieustraße 10

52074 Aachen

Internet: www.eonerc.rwth-aachen.de

E-Mail: post_erc@eonerc.rwth-aachen.de

Herstellung:

afterglow

Vaalser Str. 20-22

52064 Aachen

TANJA OSTERHAGE

Messdatengestützte Analyse und Interpretation
sanierungsbedingter Effizienzsteigerungen im Wohnungsbau

An dieser Stelle möchte ich all jenen DANKE sagen,
die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung
zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Kurzfassung

Die Bundesregierung hat in vielen Bereichen wichtige Weichen für die Energiewende gestellt. Die entsprechenden Gesetze und Verordnungen sind in den letzten zwei Jahren auf den Weg gebracht worden, um den Ausbau der erneuerbaren Energien, den Netzausbau, den Bau hocheffizienter fossiler Kraftwerke, die Energieeffizienz und Energieforschung weiter voranzubringen.

Aktuelle Zahlen belegen, dass die Ziele zur Erreichung der Energiewende und den damit verbundenen Energie- und CO₂-Einsparungen nur mit zusätzlichen Anstrengungen zu erreichen sind (BMW_i 2016). Die Stromwende schreitet gut voran; aber die Wärmewende ist noch nicht in Schwung gekommen. Für den Gebäudesektor liegt dies zum einen an der geringen Neubau- und Sanierungsquote sowie zum anderen an der häufig auftretenden Performancelücke.

Welche Gründe dazu führen, dass sich die im Vorfeld einer Baumaßnahme ermittelten Bedarfswerte im Betrieb nicht immer einstellen, dieser Frage geht die vorliegende Arbeit nach. Die Datenbasis bilden die Ergebnisse zweier Forschungsprojekte in Karlsruhe-Rintheim. Hier wurden drei Gebäuderiegel, welche in den 1950er Jahren erbaut wurden, baukonstruktiv und anlagentechnisch ertüchtigt. Jeder dieser Gebäuderiegel verfügt über drei Eingänge mit jeweils zehn identisch geschnittenen Wohnungen auf fünf Etagen. Somit konnten letztendlich sieben unterschiedliche Sanierungskonzepte umgesetzt werden. Auf Basis einer detaillierten Messdatenanalyse aus zwei Heizperioden werden die nutzerspezifischen Verhaltensweisen herausgearbeitet, die sich nach unterschiedlichen energetischen Sanierungen in zwei der drei Wohngebäuderiegeln eingestellt haben.

Die Analyse der Messdaten hat gezeigt, dass im Gegensatz zur Nutzung der unsanierten Wohnungen tendenziell eine Vergleichmäßigung der Temperaturen innerhalb der Wohnungen vorliegt, und einzelne Räume nicht ausgespart werden. Die vom Nutzer gewünschte Innenraumtemperatur liegt nicht im Bereich der normativen Vorgaben von 19/20 °C, sondern darüber, im Mittel bei 22 °C. Eine Erhöhung der Bilanztemperatur um lediglich 1 K führt zu einem Anstieg des rechnerischen Heizwärmebedarfs von bis zu 16 % je nach Sanierungsvariante.

Die internen Gewinne werden erheblich durch die heutige Lebensweise und -form beeinflusst. Aufgrund des demographischen Wandels ist der Wohnflächenverbrauch pro Person gestiegen, gleichzeitig ist auch eine Zunahme an elektrischen Geräten in den Wohnungen zu verzeichnen. Zu beachten ist jedoch, dass die moderneren Geräte deutlich weniger Wärmeentwicklung aufweisen als früher. Im Durchschnitt wurde für die im Betrachtungsgebiet vorzufindende Bevölkerungsstruktur ein Ansatz von 8,9 W/m² - im Vergleich zu 5 W/m² nach Norm - für die internen Gewinne ermittelt.

Das Lüftungsverhalten hängt individuell vom Nutzer ab. Trotz Vorhandensein einer maschinellen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) oder Zwangslüftungselement im Fensterrahmen wird das Fenster vom Nutzer zum Lüften geöffnet. Als Gründe wird bspw.

schlechte Luft oder hohe Luftfeuchte angegeben. Die Analyse hat gezeigt, dass dies durch die vorhandenen Messdaten nicht bestätigt werden kann. Allen Nutzern gemeinsam ist, dass bei geringeren Außentemperaturen kleiner $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Fenster kürzer geöffnet werden als bei Temperaturen größer $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Vorhandensein einer Lüftungsanlage führt nicht unweigerlich zu einem anderen Lüftungsverhalten. Im Zuge der Messdatenanalyse wurden manuelle Fensterluftwechsel im Bereich zwischen $0,19$ und $0,44\text{ h}^{-1}$ ermittelt. Hinzu kommen je nach Sanierungsvariante der Luftwechsel der Lüftungsanlage sowie ggfs. auftretende Leckageströme durch Undichtigkeiten. Dies bedeutet bspw. für eine Sanierungsvariante mit Zwangslüftung ($0,44\text{ h}^{-1}$) eine näherungsweise Übereinstimmung mit dem normativen Ansatz von $0,55\text{ h}^{-1}$.

Mit wachsendem Lebensstandard ist der Wasserverbrauch in den letzten Jahren gestiegen. Für den Bedarf an Trinkwarmwasser können pro Person und Tag rund 40 Liter angesetzt werden; der tatsächliche Verbrauch hängt allerdings stark von den Nutzergewohnheiten ab. Nach Energieeinsparverordnung (EnEV) ist ein Wert von $12,5\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für die Berechnung des Trinkwarmwasser-Energiebedarfs anzusetzen. In energieeffizienten Gebäuden kann der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung sogar größer sein als der für die Beheizung. Die Auswertung der Messdaten hat gezeigt, dass für die verschiedenen Systeme deutliche Speicher- und Verteilverluste vorhanden sind. Die Messdaten der dezentralen Systeme geben Aufschluss darüber, dass für einen Eingang mit zehn Wohnungen ein jährlicher Verbrauch von $12,0$ bis $12,5\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, also im Rahmen der EnEV, vorliegt. Zwischen einzelnen Nutzern einer Sanierungsvariante sind jedoch deutliche Unterschiede festzustellen.

Eine erneute EnEV-Berechnung ergibt unter Berücksichtigung der individuell, aus der Messdatenanalyse ermittelten Parameter, eine breite Varianz in der Streuung der Bedarfswerte. Die Gegenüberstellung mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten zeigt für die meisten Sanierungsvarianten eine Unterschätzung des Bedarfs. Allerdings sind auch Parametervariationen vorzufinden, die die Verbrauchswerte der jeweiligen Jahre einhalten bzw. in deren Bereich liegen.

Durch die gewonnenen Ergebnisse können die Aussagen bereits vorliegender Analysen (bspw. Felsmann und Schmidt 2013; Richter et al. 2002) bekräftigt werden. Das individuelle Nutzerverhalten muss unweigerlich zu einer Abweichung zwischen Heizwärmebedarfs- und Verbrauchswerten führen. Ob eine Anpassung der Parameter in der Normung für die Bilanzinnentemperatur, die internen Gewinne oder den Luftwechsel zielführend sein kann, wird in der vorliegenden Arbeit diskutiert, kann aber aufgrund der geringen Stichprobenmenge nicht abschließend beantwortet werden. Abschließend werden zum einen Vorschläge zur Bewusstmachung des Energieverhaltens sowie weitergehende technische Möglichkeiten zur Regelung der Bedarfsparameter und zum anderen mögliche Anforderungen an eine umfassende Energieberatung aufgezeigt.

Abstract

The federal German government has set the course for an energy transition in various important areas. Many laws and ordinances have been developed and passed over the last two years, further supporting the expansion of renewable energies and power grids, motivating the construction of highly efficient fossil power plants and driving improvements in energy efficiency and energy research.

However, current studies show that the targets for the energy transition and the related reduction of energy consumption and CO₂ emissions still require additional efforts (BMWi 2016). The decarbonisation of electricity generation is progressing well; however, a transformation of the “Wärmewende” has hardly yet begun. For the building sector, this is due to the low new construction and refurbishment rates, which are often driven by the frequently occurring performance gap.

Why do the expected heat demand values calculated prior to constructions diverge from the actual consumption during the operation of the building? The database rest on the results of two research projects in Karlsruhe-Rintheim. Here, three building blocks, which were built in the 1950s, were upgraded in terms of construction and system engineering. Each of these building blocks has three entrances, each with ten identical apartments on five floors. Thus, seven different refurbishment concepts were finally implemented. This work approaches that question with a detailed measurement data analysis based on two heating periods and six different residential buildings, evaluating the user behavior that has been observed after the energetic refurbishment of these buildings.

The data analysis reveals that in contrast to non-renovated apartments with typically different temperatures in individual rooms, there is now a tendency towards equalized temperatures throughout the whole flat. The room temperature favored by the residents is on average 22 °C and thus out of the standardized range of 19 to 20 °C. This difference in interior temperatures leads to an increase of the heating demand by up to 16 %.

The internal heat gains are strongly influenced by today's way of life. Due to the demographic change, the floor space consumption per person has risen. At the same time, there is also an increase of electrical appliances in dwellings, with in turn decreasing heat emissions of modern devices. On average, 8.9 W/m² of internal heat gains have been calculated for the population structure in the observed survey area.

The ventilation behavior depends on the individual user. Despite of the presence of a mechanical ventilation system with heat recovery or a forced ventilation, the windows are opened by the user for ventilation purposes. The stated reasons are, for example, poor air quality or high humidity. However, the analysis of the measurement data shows that actually this is only extremely rarely the case. It is common to all users that the windows are opened shorter at temperatures below 0 °C, than at temperatures above 0 °C. The presence of a ventilation system does not inevitably lead to a different ventilation behavior. In the

course of the measurement data analysis window based air exchange rates in the range between 0.19 and 0.45 h⁻¹ were determined. Together with the air exchange rates of the installed ventilation systems the refurbishment with the forced ventilation reach the standardized air exchange requirement of 0.55 h⁻¹.

With the rising living standards also the water consumption increased in recent years. As for the domestic hot water consumption (DHW), about 40 liters per person per day can be estimated; however, the actual consumption depends strongly on the specific user behavior. The German energy saving ordinance EnEV provides a value of 12.5 kWh/(m²a) for the resulting average energy demand. Thus, in very energy-efficient buildings, the energy demand for domestic hot water (DHW) can be even greater than for heating. The evaluation of the measured data has shown significant storage and distribution losses for the various observed DHW systems. The data of the analyzed decentralized DHW systems has shown an average yearly consumption of 12.0 to 12.5 kWh/(m²a), thus being well in accordance with the EnEV. Nevertheless, there are large deviations between individual users.

A new energy demand calculation according to EnEV based on the individual specific parameters determined from the measured data analysis shows a wide distribution of the demand values. The comparison with the weather-adjusted actual energy consumption values reveals an underestimation of the energy demand for most evaluated refurbishment scenarios. However, there are also scenarios, which exactly meet the consumption values of the respective year.

The obtained results can confirm the results of existing studies (e.g. Felsmann and Schmidt 2013, Richter et al., 2002). The individual user behavior must inevitably lead to a deviation between heat demand and consumption values. Whether an adjustment of the parameters for the inside temperature, the internal heat gains or the air exchange rate in the standardization can be effective to reduce that deviation, cannot be conclusively clarified. Finally, proposals for raising awareness of the energy consumption behaviour as well as further technical possibilities for the regulation of demand parameters and possible requirements for comprehensive energy consulting are shown.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
1 Aktuelle energiepolitische Trends und Entwicklung der Gebäudeenergieeffizienz	1
1.1 Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland	1
1.2 Der Wohnungsbestand in Deutschland	3
1.3 Gesetzliche Anforderungen	4
1.4 Ziel der Arbeit	6
2 Stand der Technik	9
2.1 Berechnungsverfahren und normative Grundlagen	9
2.1.1 Grundlagen der DIN V 4108-6 / DIN V 4701-10	10
2.1.2 Grundlagen der DIN V 18599	13
2.1.3 Witterungsbereinigung von Verbrauchsdaten	15
2.1.4 Definition der Energieperformancelücke (EPL)	16
2.2 Baukonstruktive und anlagentechnische Sanierungsmaßnahmen	17
2.2.1 Transmissionswärmeverluste im Gebäudebestand und mögliche Sanierungsmaßnahmen	17
2.2.2 Anlagenverluste im Gebäudebestand und mögliche Sanierungsmaßnahmen	19
2.3 Abweichung zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten	21
3 Sanierung eines typischen Wohngebäudes der 60er Jahre	25
3.1 Ausgangszustand der Gebäude	25
3.2 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen	27
3.2.1 Sanierungsvarianten von Riegel R1	29
3.2.2 Sanierungsvarianten von Riegel R2	31
3.2.2.1 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 1	32
3.2.2.2 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 2	33
3.2.2.3 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 3	34
3.2.3 Sanierungsvarianten von Riegel R3	35
3.2.3.1 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 1	36
3.2.3.2 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 2	37
3.2.3.3 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 3	38
3.3 Bedarfsberechnungen nach EnEV und bilanzierte Energieeinsparpotentiale	38
3.3.1 Excel-Tool zur Erstellung von EnEV-Berechnungen auf Basis von DIN V 4108/ DIN V 4701	40
3.3.2 Energieeinsparpotential der Gebäudehülle: spezifischer Transmissionswärmetransferkoeffizient	41

3.3.3	Jahres-Heizwärmebedarf vor und nach der Sanierung	43
3.3.4	Jahres-Endenergiebedarf vor und nach der Sanierung	44
3.3.5	Primärenergieeinsparpotential nach der energetischen Sanierung	45
3.3.6	Vergleich des spezifischen Heizwärmebedarfs nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 und DIN V 18599	46
4	Monitoring.....	49
4.1	Messtechnisches Konzept.....	49
4.1.1	Installierte Messtechnik im Raum	50
4.1.2	Installierte Messtechnik im Gebäude	51
4.1.3	Installierte Messtechnik im Außenbereich	52
4.2	Datenmanagement und Auswertung	53
4.2.1	Erzeugung von HDF5-Dateien	53
4.2.2	HDF5-Viewer zur Analyse und Visualisierung der Messdaten	54
4.3	Kennwerte aus dem Monitoring	54
4.3.1	Gegenüberstellung der Außentemperaturen und Strahlung	54
4.3.2	Gegenüberstellung der Heizgradtage	56
4.3.3	U-Wert-Analysen	58
4.3.4	Wärmepumpen und deren Arbeitszahlen	62
4.3.5	Vergleich der Heizwärmeverbrauchsdaten	65
4.3.6	Ergebnisse des Trinkwarmwasserverbrauchs	67
4.3.7	Vergleich des Trinkwarmwasser- und Heizwärmeverbrauchs für Riegel R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3	69
4.3.8	Gegenüberstellung des Gesamtenergieverbrauchs für Riegel R2.E1 und R3.E1	71
4.4	Innenraumzustände und Nutzerverhalten	73
4.4.1	Gemessene Wohnungstemperaturen	73
4.4.2	Fensteröffnungsverhalten	76
4.4.3	Gemessene relative Feuchte	78
4.4.4	CO ₂ -Gehalt in den Wohnungen	81
4.4.5	Begleitende Nutzerbefragung und deren Ergebnisse	83
4.5	Wärmeverschiebung innerhalb eines Riegels	87
5	Vergleich von Bedarfs- und Verbrauchswerten	93
5.1	Gegenüberstellung der Heizwärmeverbräuche mit den Bedarfswerten.....	93
5.2	Vergleich der Energiebedarfs- und -verbrauchswerte für die Trinkwarmwassererzeugung.....	94
5.3	Gegenüberstellung der Endenergieverbräuche und -bedarfswerte	95
5.4	Vergleich der Primärenergieverbrauchs und -bedarfswerte	96
5.5	Analyse der Energieperformancelücke	97
6	Auswirkungen individueller Parameter auf die Energiebedarfsberechnung	101
6.1	Direkte und indirekte Nutzereingriffsmöglichkeiten	101
6.2	Analyse der gemessenen Innenraumtemperaturen	102

6.2.1	Temperaturanalyse für das Badezimmer	103
6.2.2	Temperaturanalyse für die Küche	104
6.2.3	Temperaturanalyse für das Wohnzimmer	105
6.2.4	Temperaturanalyse für die Sanierungsvarianten.....	107
6.2.5	Auswirkungen der gemessenen Innenraumtemperaturen auf die Bedarfsberechnungen nach EnEV.....	110
6.3	Untersuchung des Lüftungsverhaltens	111
6.3.1	Analyse des Fensteröffnungsverhaltens	111
6.3.1.1	Fensteröffnungsverhalten im Badezimmer.....	112
6.3.1.2	Fensteröffnungsverhalten in der Küche	114
6.3.1.3	Fensteröffnungsverhalten im Wohnzimmer.....	116
6.3.2	Gegenüberstellung des Fensteröffnungsverhaltens für die einzelnen Sanierungsvarianten.....	118
6.3.3	Ermittlung der vorhandenen Luftwechselzahlen.....	120
6.3.3.1	Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung im Badezimmer	123
6.3.3.2	Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung in der Küche	124
6.3.3.3	Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung im Wohnzimmer	125
6.3.4	Gegenüberstellung der Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung für die einzelnen Sanierungsvarianten.....	126
6.3.5	Auswirkungen des ermittelten Luftwechsels auf die Bedarfsberechnungen nach EnEV.....	128
6.4	Betrachtung der internen Wärmegewinne.....	130
6.4.1	Ansätze zur Bilanzierung interner Wärmegewinne aus der Literatur	130
6.4.2	Entwicklung der Berücksichtigung interner Wärmegewinne in der Normung	131
6.4.3	Ermittlung der Basisdaten zur Bestimmung der internen Wärmegewinne für die betrachteten Gebäude.....	132
6.4.3.1	Mieterstrukturen.....	132
6.4.3.2	Angesetzter Bilanzraum.....	133
6.4.4	Abschätzung der internen flächenbezogenen Wärmeströme und Zusammenwirken der einzelnen Quellen	133
6.4.4.1	Einfluss der Nutzer	133
6.4.4.2	Abschätzung des Stromverbrauchs privater Haushalte.....	133
6.4.4.3	Abschätzung der Geräteausstattung und Betriebsdauer.....	134
6.4.4.4	Abschätzungen der flächenbezogenen internen Wärmeströme	135
6.4.5	Auswirkungen der ermittelten internen Gewinne auf den Heizwärmebedarf nach EnEV	136
6.5	Analyse des Trinkwarmwasser-Energieverbrauchs für die dezentralen Systeme	138
6.5.1	Gegenüberstellung von Zapfprofilen	138
6.5.2	Gegenüberstellung des wohnungsweisen Energieverbrauchs im Jahresverlauf.....	143
6.5.3	Vergleich des jährlichen Energieverbrauchs für die dezentrale Trinkwarmwassererzeugung.....	145
6.5.4	Auswirkungen des ermittelten Energieverbrauchs für die Trinkwarmwassererzeugung auf die Energiebedarfsberechnung.....	147

6.6	Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs unter Verwendung der gewonnenen Messdaten und der Verbrauchswerte	147
7	Fazit	155
8	Ausblick	159
9	Nomenklatur	163
10	Abbildungsverzeichnis	169
11	Tabellenverzeichnis	179
12	Literaturverzeichnis	181
13	Anhang	189
13.1	Innenraumtemperaturen während der Heizperiode 2012	189
13.2	Innenraumtemperatur während der Heizperiode 2013	191
13.3	Lüftungsverhalten während der Heizperiode 2012.....	198
13.4	Lüftungsverhalten während der Heizperiode 2013.....	201
13.5	Trinkwarmwasserverbrauch im Jahr 2012	213
13.6	Trinkwarmwasserverbrauch im Jahr 2013	214

1 Aktuelle energiepolitische Trends und Entwicklung der Gebäudeenergieeffizienz

1.1 Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland

Nach Angaben der Bundesregierung sind zur Erreichung der klimapolitischen Ziele 2020 gegenüber dem Basisjahr 2008 eine zusätzliche Primärenergieeinsparung von ca. 10 bis 13 % (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2014b) sowie zusätzliche CO₂-Einsparungen von 5 bis 8 % (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2014) notwendig. Die bisherigen Anstrengungen und Maßnahmen sind zur Zielerreichung nicht ausreichend.

Im Dezember 2014 wurde das „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ durch die Bundesregierung beschlossen. In Verbindung mit dem „Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz“ (NAPE) gilt die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden als ein wichtiger Eckpfeiler, um die Klimaschutzziele bis 2020 zu erreichen (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2014a).

Mit Hilfe dieser beiden Programme schafft die Bundesregierung Anreize Energieeffizienzmaßnahmen durchzuführen. Als zentrale Punkte für den Gebäudebereich sind Investitionszuschüsse, zinsgünstige Darlehen (KfW), eine Verbesserung der Informationen für Gebäudeeigentümer sowie die Entwicklung einer neuen „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ durch das BMWi im Jahr 2015 und die „Strategie klimafreundliches Bauen und Wohnen“ durch das BMUB, zu nennen. Alle Maßnahmen haben zum Ziel, die momentane jährliche Sanierungsrate zu verdoppeln (BMW i 2010).

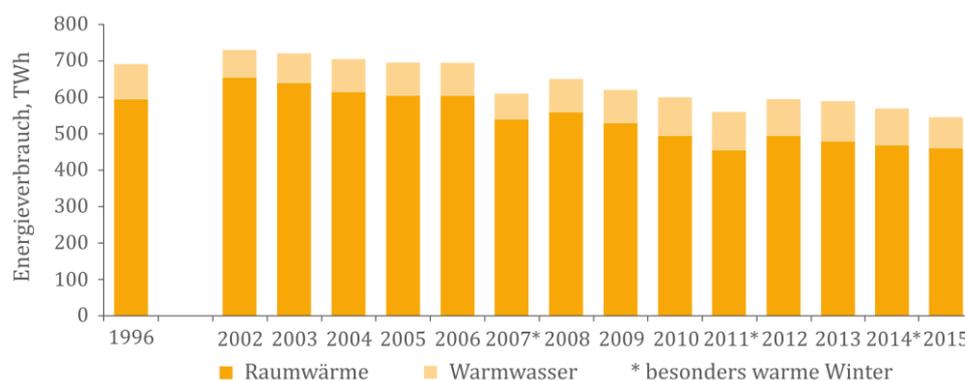


Abb. 1-1: Entwicklung des Energieverbrauchs für Raumwärme (witterungsbereinigt) und Warmwasser in Wohngebäuden von 2002 bis 2015 im Vergleich zum Basisjahr 1996 (in Anlehnung an dena 2016)

Seit dem Jahr 2002 ist der Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser um rund 21 % gesunken. Seit 2010 ist keine fallende Tendenz mehr erkennbar (dena 2016). Neben dem Energieverbrauch sind auch die entstehenden Kosten von volkswirtschaftlicher Be-

deutung und bei der Effizienzbetrachtung mit einzubeziehen. Der Energieverbrauch belastet die Haushalte mit über 80 Mrd. €. Auf den Bereich der Räumwärme entfällt der größte Anteil mit 50 Mrd. €. Für Warmwasser und Beleuchtung werden jeweils 15 Mrd. € ausgegeben (Stolte et al. 2013b).

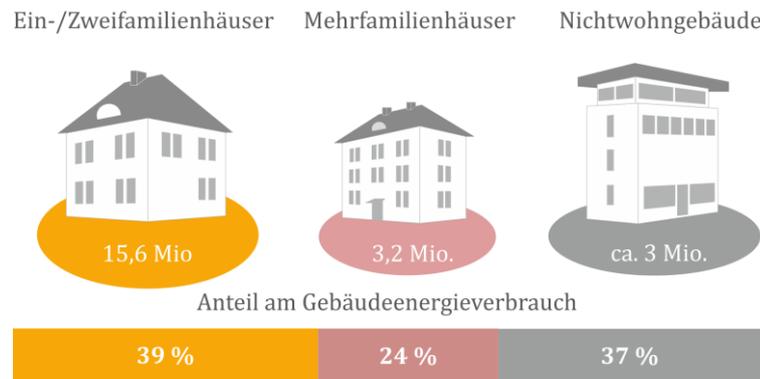


Abb. 1-2: Gegenüberstellung des Endenergieverbrauchs nach Gebäudetypen (in Anlehnung an dena 2016)

Wie Abb. 1-2 zu entnehmen ist, gibt es in Deutschland mehr Ein- und Zweifamilienhäuser als Mehrfamilienhäuser. Die Ein- und Zweifamilienhäuser weisen im Gegensatz zu Mehrfamilienhäusern große Wohnflächen auf. Dies führt zu hohen quadratmeterbezogenen Energieverbräuchen und letztendlich zu einem 39 %-igen Anteil am Gesamt-Endenergieverbrauch in Deutschland (Stolte et al. 2013b).

Mehrfamilienhäuser verfügen je Gebäude im Vergleich zu Ein- und Zweifamilienhäusern über mehr Wohneinheiten und Wohnfläche. Durch das bessere A/V-Verhältnis weisen die Gebäude geringere quadratmeterbezogene Verbräuche auf. In Kombination mit der geringen Anzahl von Gebäuden führt dies zu einem Anteil von 24 % am Endenergieverbrauch.

In Abb. 1-3 ist grafisch der Mehrfamilienhausanteil der 50/60er Jahre am Wohngebäudebestand in Raumordnungsregionen dargestellt. Eine Unterteilung der Häufigkeit der Baualtersklasse kann in Ost- und Westdeutschland vorgenommen werden. Während in den neuen Bundesländern ein maximaler Anteil von 20 % vorhanden ist, weisen die alten Bundesländer Anteile von bis zu 46 % auf. Im Ruhrgebiet sowie in zentralen Lagen mit überdurchschnittlicher Infrastruktur sind besonders hohe Anteile von Mehrfamilienhäusern im Bestand ablesbar (Stolte et al. 2013b).

In den letzten Jahren ist ein Rückgang der Neubauvorhaben zu verzeichnen. Der Gebäudebestand wird kontinuierlich verbessert, allerdings führen die durchgeführten Maßnahmen nicht immer zu einer Steigerung der Energieeffizienz. Die demografische Entwicklung lässt eine zukünftige Überalterung der Bevölkerung erkennen. Der Wohngebäudebestand der 50/60er Jahre ist „in die Jahre gekommen“ und passt weder energetisch noch ausstattungs-technisch zu den heutigen Wohnvorstellungen (Eduard Pestel Institut e.V. 2009).

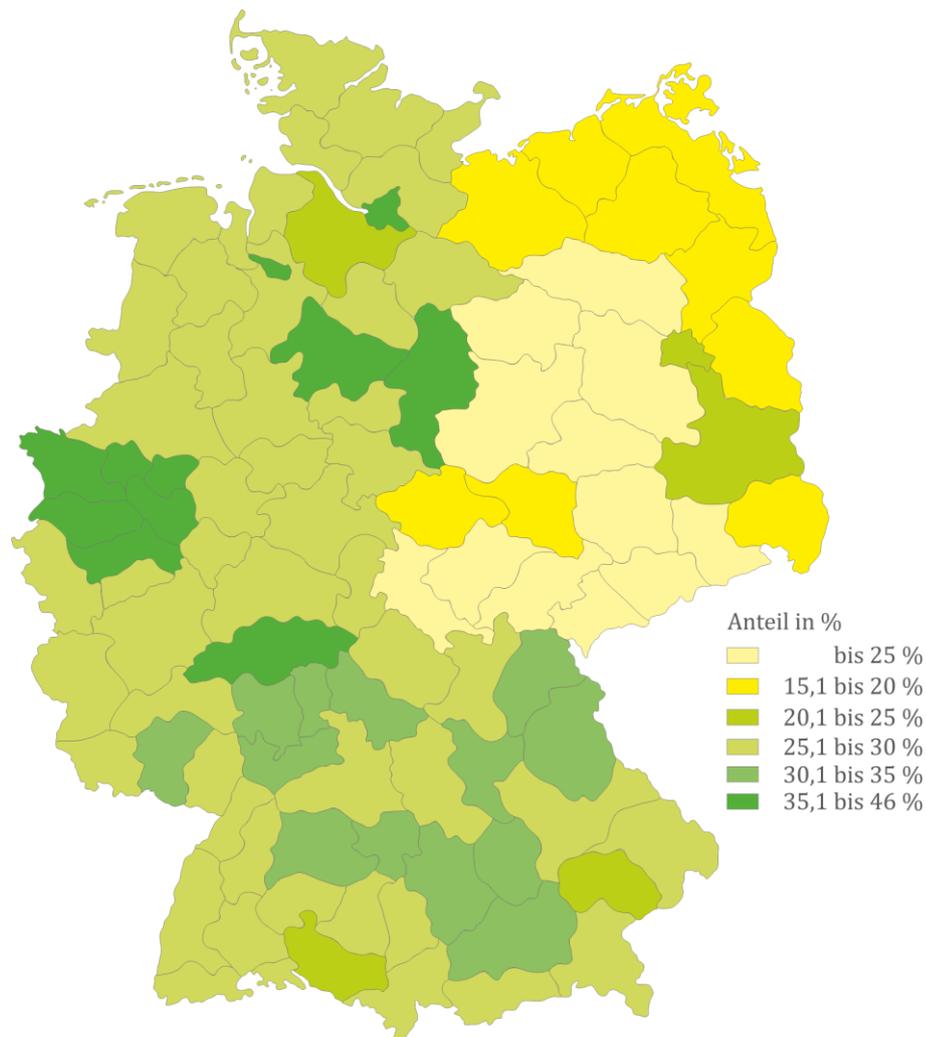


Abb. 1-3: Wohnungsbestand der Bauten der 50er und 60er Jahre in Deutschland (in Anlehnung an Bundesamt für Raumordnung 2008)

1.2 Der Wohnungsbestand in Deutschland

In Deutschland fehlen nach Ende des zweiten Weltkriegs rund fünf Millionen Wohnungen. Viele Gebäude sind zerstört und müssen wieder aufgebaut oder neu gebaut werden, zudem ist ein Bevölkerungswachstum festzustellen. Zur Beschleunigung des Prozesses wird von der Regierung 1950 das erste Wohnungsbaugesetz verabschiedet. Damit nimmt der öffentlich geförderte Wohnungsbau seinen Anfang. Von den Wohnungsbaugesellschaften werden in den Folgejahren überwiegend Sozialwohnungen gebaut (Wohnungswirtschaft 2005).

Nach wie vor ist ein baukultureller Wert der Quartiere aus den 50/60er Jahren feststellbar. Diese Wohngebiete werden von den Bewohnern häufig bevorzugt ausgewählt, wegen der gewachsenen Struktur und den meist günstigen Mieten. In der Mitte der 50er Jahre folgt eine Novellierung des Wohnungsbaugesetzes. Dies führt dazu, dass die durchschnittliche Wohnungsgröße für Familien von 50 auf 60 - 70 m² ansteigt. Mit diesem Flächenzuwachs nimmt auch der Standard der Wohnung zu.

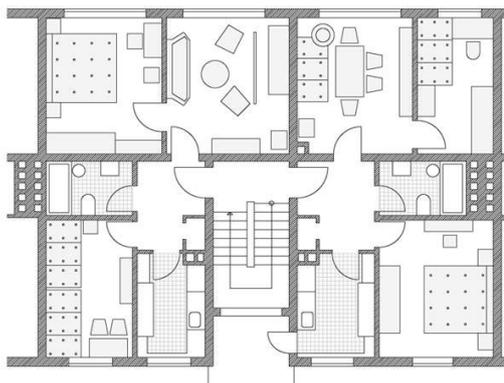


Abb. 1-4: Beispielgrundriss eines Zweispanners aus den 50er Jahren
(in Anlehnung an Wohnungswirtschaft 2005)

Die Wohngebäude werden zunächst als Zwei- und teilweise auch als Dreispänner mit einem zentralen Treppenraum erbaut. Die Wohnungen sind meist als Drei-Zimmer-Wohnungen mit einer kleinen Küche und Badezimmer erstellt (siehe Abb. 1-4) (Wohnungswirtschaft 2005). Unter Berücksichtigung heutiger Anforderungen an eine familiengerechte Wohnung funktioniert der in Abb. 1-4 dargestellte Grundriss nur noch bedingt. Die damals gültigen Flächenstandards sind im heutigen Zeitalter nur noch im Bereich des sozialen Wohnungsbaus vorzufinden.

Im Laufe der Jahre haben bei diesen Gebäuden lediglich Instandhaltungsarbeiten und kleinere (Teil-)Sanierungen stattgefunden; daher ist der Fortbestand dieser Gebäude nicht gesichert. Aus heutiger Sicht ist die Bausubstanz der Bestandsgebäude im Hinblick auf die bauphysikalischen Anforderungen sowie Anlagentechnik nicht mehr ausreichend. Durch das Vorhandensein von ungedämmten Bauteilen und den damit einhergehenden Wärmebrücken werden die raumklimatischen Verhältnisse in den Wohnungen von den Nutzern häufig als unbefriedigend empfunden. Die Schaffung eines angenehmen Raumklimas führt bei diesen Gebäuden zu einem hohen Primärenergieverbrauch.

Aktuelle Förderprogramme auf Bundes- und Landesebene haben zum Ziel, den Gebäudebestand energetisch aufzuwerten. Basis für die bei einer energetischen Modernisierung einzuhaltenden Anforderungen bildet die Energieeinsparverordnung (EnEV) in Verbindung mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2014). Für den Gebäudebestand stellen diese Werte durchaus eine große Hürde dar, da die baukonstruktive/bauphysikalische Sanierung aufgrund der Gegebenheiten nicht immer umsetzbar ist.

1.3 Gesetzliche Anforderungen

In den letzten Jahren haben aufgrund der Energieknappheit die Themen Nachhaltigkeit und Energieeffizienz Einzug in das Bauwesen gehalten. Der Begriff „Wärmeschutz“ findet erstmalig durch den Erlass der DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“ Anwendung. Zum dama-

ligen Zeitpunkt begründet sich die Einhaltung der Normung durch wohngygienische Belange. Erst mit der Energiekrise in den 70er Jahre rückt die finanzielle Einsparung durch Energieeinsparung in den Fokus.

In Folge dessen werden weitere Vorschriften auf Grundlage des Energieeinsparungsgesetzes aus dem Jahr 1976 erlassen. 1996 und 2001 erfolgt eine Aktualisierung und Ergänzung der DIN 4108. Verschärfungen und weitere Anpassungen der Wärmeschutzverordnung (WSVo) finden in den Jahren 1984 und 1995 statt. Durch die Zusammenführung der Wärmeschutz- und Heizungsanlagenverordnung (HeizAnIV) im Jahr 2002 entsteht die Energieeinsparverordnung (EnEV).

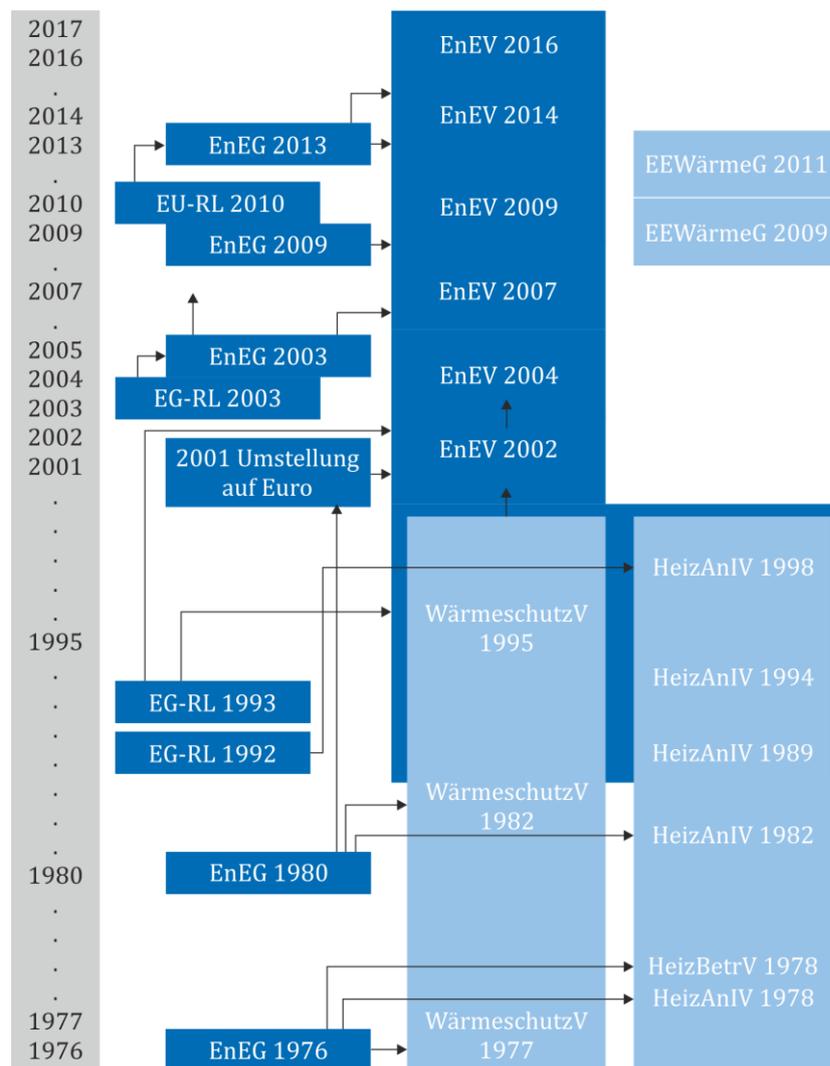


Abb. 1-5: Entwicklung der Energieeinsparverordnung

Die Einführung der EnEV ermöglicht die ganzheitliche Betrachtung des Gebäudes. Neben den bauphysikalischen Gegebenheiten werden parallel die anlagentechnischen Bestandteile gesamtheitlich bilanziert. Europaweit soll ebenfalls die Energieeffizienz von Gebäuden gesteigert werden.

Den Grundsätzen der EU-Gebäuderichtlinie wird erst durch die Einführung der EnEV 2007 Rechnung getragen. Nach weiteren zwei Jahren werden mit der EnEV 2009 die Anforderungen an Neubauten und bauliche Veränderungen um 30 % verschärft. In den Folgejahren haben weitere Verschärfungen der Anforderungen stattgefunden, um die Effizienzziele der Bundesregierung zu erreichen. Nach der EnEV 2014 folgte zum 01.01.2016 die nächste Novellierung der Energieeinsparverordnung. Für einige Teilbereiche erfolgte eine weitere Verschärfung zur EnEV 2016 zum 01.01.2017. Weitergehende Details zur geschichtlichen Entwicklung der Verordnungen kann *Abb. 1-5* entnommen werden.

Im Jahr 2011 wird eine weitgehende Neuausrichtung der Energiepolitik besiegelt. Der Focus liegt auf dem Ausstieg aus der Kernkraft und der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien. Einer der Eckpfeiler dieses Beschlusses ist die Steigerung der Energieeffizienz insbesondere durch die Gebäudesanierung und die Reduzierung des Stromverbrauchs durch moderne Technologien.

Das Ziel des „Gesetzes zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich“ – auch Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) genannt – ist die nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Energien. Dabei liegen die Schonung fossiler Energieträger und die Minderung von Energieimporten im Fokus. Bis zum Jahr 2020 soll der Anteil erneuerbarer Energien beim Endenergieverbrauch 14 % betragen (Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz Januar 2009).

1.4 Ziel der Arbeit

Im Zuge der Energiewende ist die Bundesregierung bemüht, durch ihre Vorgaben für die Erstellung von Neubauten als auch bei der Sanierung von Bestandsgebäuden den CO₂-Ausstoß und gleichzeitig den Energieverbrauch zu senken.

Die Neubaurate ist mit kleiner 2 % sehr gering, auch die Sanierungsquote erreicht nicht die geforderten Werte. Hier ist jedoch anzumerken, dass sich die Sanierungsquote lediglich auf vollsanierte Gebäude bezieht. Teilsanierungen gehen nicht in die Bilanz ein. Neben diesen geringen Quoten führen ebenfalls die erzielten Verbrauchswerte letztendlich nicht zu einer Zielerreichung (Erhorn 2007; Galvin 2013b).

Im Vorfeld der Baumaßnahme werden Bedarfsberechnungen nach EnEV erstellt. Die Basis für die Berechnungen ist in der Normung festgelegt. Beispielsweise ist für sämtliche ordnungsrechtlichen Nachweise das Standardwetter von Potsdam anzusetzen. Diese Vorgaben wurden seitens des Gesetzgebers gemacht, um eine Vergleichbarkeit des energetischen Gebäudestandards innerhalb ganz Deutschland zu ermöglichen. Für den Gebäudebesitzer* selbst dienen die Berechnungsergebnisse dazu den Energiebedarf des Gebäudes sowie den CO₂-Verbrauch abschätzen zu können, darüber hinaus aber auch als Basis zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der jeweiligen Maßnahme.

*Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung mehrerer Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten für Personen jeglichen Geschlechts.

Häufig wird nach einer energetischen Sanierung eine Diskrepanz zwischen Bedarfs- und Verbrauchswert festgestellt, die sogenannte Performancelücke (Hens et al. 2010). Für die Abwägung der einzelnen Maßnahmenvarianten ist es daher wichtig, dass Verbrauchsdaten der letzten Jahre als Basis für die Bewertung verwendet werden. In älteren Gebäuden liegt aufgrund der technischen Möglichkeiten und dem angepassten Nutzerverhalten häufig eine Teilbeheizung sowie geringe Innenraumtemperaturen vor (Künzel 1979). Dies führt zu einer Überschätzung des Bedarfs vor der Sanierung (Prebound-Effekt).

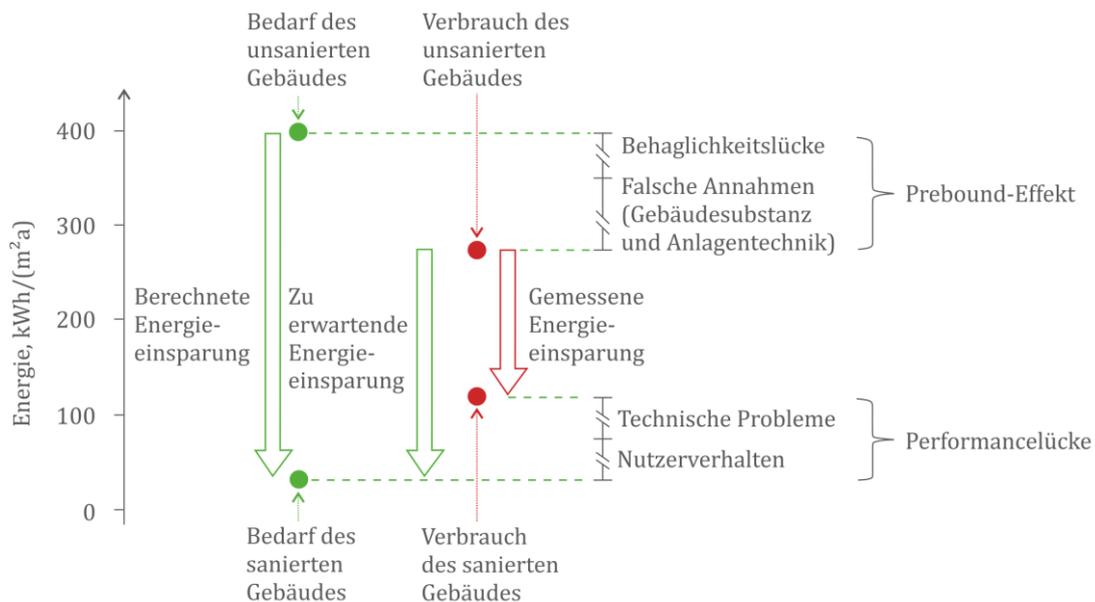


Abb. 1-6: Qualitative Darstellung von Bedarfswerten und gemessener Energieverbräuche vor und nach den Sanierungsmaßnahmen (in Anlehnung an Galvin 2013a; Cali 2016)

Die Performancelücke bezeichnet letztendlich die Differenz zwischen dem berechneten Bedarf und gemessenen Verbrauch nach einer Sanierungsmaßnahme. Dabei kann die Lücke mehr oder weniger stark ausgeprägt sein. Häufig führt dieses Ergebnis bei Mietern, die mit geringen Nebenkosten gerechnet haben, und bei Gebäudebesitzern, die mit anderen Amortisationszeiten kalkuliert haben, zu Enttäuschung.

Was sind die Gründe, die zu einer Diskrepanz zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten führen? Welche Parameter beeinflussen die einzelnen Kenngrößen? Bei der Betrachtung der Heizwärme sind neben den bauphysikalischen Gegebenheiten die Innenraumtemperatur, die internen und solaren Gewinne sowie der Luftwechsel von Belang. Über eine Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten, ohne Berücksichtigung der Solarstrahlung, wird ein Abgleich der jährlich vorhandenen Außentemperaturen vorgenommen. Alle anderen Werte werden durch die Normung für die Berechnung vorgegeben. Für einen Nachweis nach DIN V 4108 in Verbindung mit DIN V 4701 werden für die Bilanzinnentemperatur ein Wert von 19 °C, ein Luftwechsel von 0,6 h⁻¹ und interne Gewinne von 5 W/m² angesetzt. Für die Ermittlung der End- und Primärenergiebedarfswerte kommen sämtliche spezifischen

anlagentechnischen Parameter hinzu. Ein Teil dieser Daten kann aus Kennblättern der Hersteller entnommen und bei der Berechnung verwendet werden. Für die restlichen anlagen-spezifischen Parameter, bspw. Speicher- oder Verteilverluste, sind Vorgaben in den Anhängen der Normung enthalten. Für die Berechnung des Energiebedarfs zur Trinkwarmwassererzeugung wird nach EnEV ein Wert von $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für q_{tw} vorgegeben.

Die Vielzahl an normativen Vorgaben für die Bedarfsberechnung muss unweigerlich dazu führen, dass keine exakte Übereinstimmung zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten erzielt werden kann. Für die Zukunft ist es daher wünschenswert belastbare Ergebnisse liefern zu können, dies kann ggfs. durch die Angabe eines Spektrums für den Energiebedarf erreicht werden. Abweichungen zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten in einem Bereich von 50 bis 200 % (siehe Erhorn 2007) sollten in Zukunft zu den Ausnahmen gehören, da sie verunsichern und teilweise sogar zu einem Rückgang der Energieeffizienzbemühungen führen. Auf Basis der Auswertung von sechs unterschiedlichen energetischen Sanierungen im Bereich von Mehrfamilienhäusern, geht die vorliegende Arbeit der Frage nach, ob die normativen Ansätze für die mittlere Wohnungsinnentemperatur, die Luftwechselzahl, die internen Gewinne sowie der Energiebedarf für die Trinkwarmwassererzeugung bestätigt werden können bzw. welche Abweichungen sich ggfs. feststellen lassen.

Die Basis für die vorliegende Analyse bilden die Messdaten aus einem vom BMWi geförderten Forschungsvorhaben. Dieses hat sich in den Jahren 2008 bis 2014 mit der energetischen Sanierung von Bestandswohngebäuden der 50/60-Jahre und den dadurch erzielbaren Energieeinsparungen beschäftigt. Auszüge der vorliegenden Arbeit wurden bereits im Vorfeld in zwei Forschungsberichten bei der TIB Hannover sowie in diversen Fachaufsätzen („Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen“ / „Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test“ / „Analysis of the occupants' behavior related to natural ventilation“ / „Auswirkung von Wärmeverchiebungsvorgängen in energieeffizient sanierten Bestandswohngebäuden“ / „Energy Performance Gap - Erfahrungen mit sanierten Wohnungen - Teil 1+2“ / „Ergebnisse einer energetischen Sanierung : Abweichung zwischen Energiebedarf und Verbrauch ; ist nur der Nutzer Schuld?“ / „Systematische Untersuchung von Sanierungsmaßnahmen für Wohngebäude der 50- und 60er Jahre : Ergebnisse“ / „Evaluation of different energy-efficient refurbishments“ / „Rebound-Effekt bei der Sanierung von Bestandsgebäuden“ / „Rebound-Effekt: Saniert verbraucht mehr als kalkuliert“ / „Rebound-Effekt bei der Sanierung von Bestandswohngebäuden der 50/60er Jahre“ / „Ganzheitliche Sanierung und Monitoring für Bestandswohngebäude der 1950/60er Jahre“ / „Holistic Renovation and Monitoring of Residential Buildings“) publiziert. Ergänzend dazu wurden in den Jahren 2009 bis 2016 Fachvorträge auf unterschiedlichen wissenschaftlichen Tagungen gehalten.

2 Stand der Technik

2.1 Berechnungsverfahren und normative Grundlagen

Um die Abhängigkeit Deutschlands von Energieimporten zu verringern und die aktuellen Klimaschutzziele zu erreichen, muss das Energieeinsparpotential im Gebäudesektor erschlossen werden. Durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) wird die gesetzliche Grundlage hierfür geschaffen. Die EnEV gilt für fast alle Gebäude (Neubau/Bestand), die beheizt oder klimatisiert werden; ihre Vorgaben beziehen sich neben der Heizungs- und Klimatechnik vor allem auf den Wärmedämmstandard des Gebäudes. Die EnEV trägt somit wesentlich dazu bei den Energieverbrauch und somit die Energiekosten zu reduzieren; indirekt sorgt sie dadurch für ein behagliches Innenraumklima.

Die Energieeinsparverordnung gibt drei Hauptforderungen an Wohngebäude vor (Hennicke 2008). Zum einen sind die Wohngebäude so auszuführen, dass der Primärenergiebedarf Q_P für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung den Wert eines Referenzgebäudes nicht überschreitet. Als zweite Forderung ist die Einhaltung der vorgegebenen Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustes H'_T zu nennen (siehe Tab. 2-1). Außerdem sind die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes einzuhalten, um eine Überhitzung der Gebäude im Sommer zu verhindern.

Tab. 2-1: Grenzwerte Transmissionswärmeverlust nach Gebäudeart nach EnEV 2016

Gebäudeart	Grenzwert H'_T W/(m ² K)
Freistehendes Wohngebäude mit $A_N > 350 \text{ m}^2$	0,50
Freistehendes Wohngebäude mit $A_N < 350 \text{ m}^2$	0,40
Alle anderen Wohngebäude	0,65
Einseitig angebautes Gebäude	0,45
Erweiterungen und Ausbauten von Wohngebäuden gemäß § 9 Absatz 5	0,65

Im Zuge eines EnEV-Nachweises sind daher zwei Werte zwingend einzuhalten. Zum einen der Jahresprimärenergiebedarf Q_P und zum anderen der spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust H'_T . Die Vorgaben der EnEV beziehen sich auf die Höchstwerte eines Referenzgebäudes. Das Referenzgebäude weist die gleiche Geometrie, Ausrichtung und Gebäudenutzfläche wie das nachzuweisende Gebäude auf (Hennicke 2008). Zusätzlich zur Einhaltung der Höchstwerte des Referenzgebäudes sind die Grenzwerte nach Tab. 2-1 einzuhalten.

Die Nachweisführung nach EnEV kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen (siehe Abb. 2-1). Zum einen ist der Nachweis unter Verwendung der energetischen Bewertung von Gebäuden nach DIN V 18599 möglich. Zum anderen kann auch die DIN EN ISO 13790 in Verbindung mit den Vornormen DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 verwendet werden. Diese

Nachweisführung ist seit der EnEV 2009 nur noch mit dem Monatsbilanzverfahren möglich. Zur Vergleichsmöglichkeit sämtlicher Gebäude in Deutschland sind bei der Nachweisführung die Wetterdaten der Klimaregion Potsdam zu berücksichtigen.

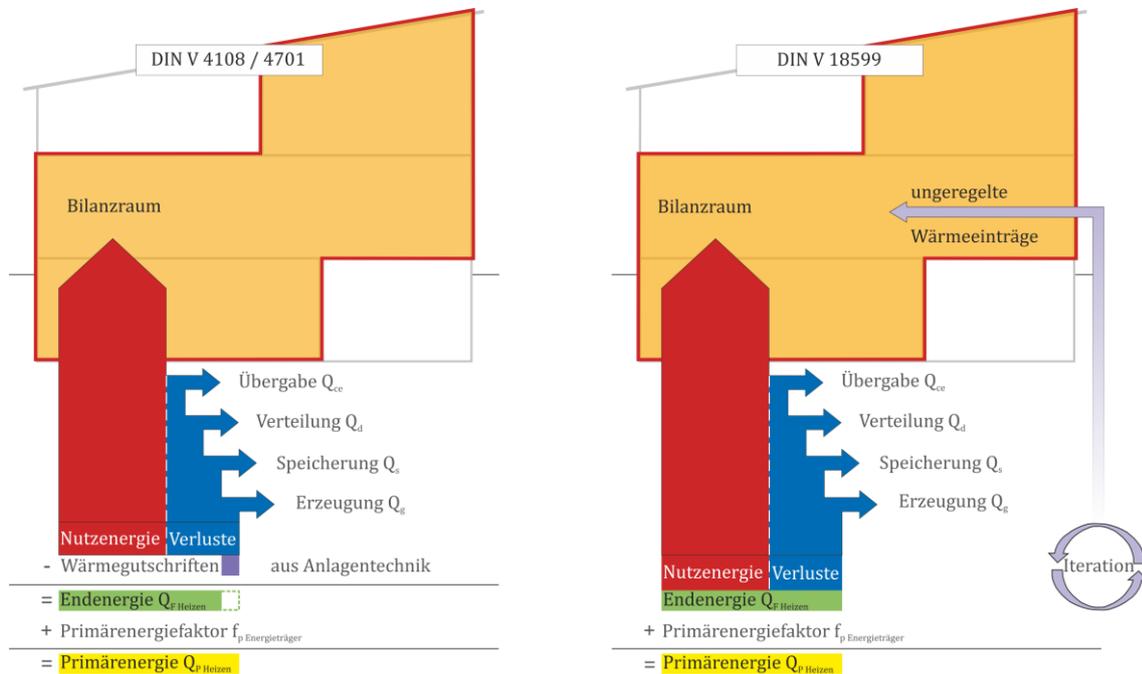


Abb. 2-1: Vergleich der Bilanzierungsverfahren nach DIN V 4108/4701 und DIN V 18599 (in Anlehnung an Raack 2011)

2.1.1 Grundlagen der DIN V 4108-6 / DIN V 4701-10

Die DIN V 4108-6 bildet die Grundlage zur Ermittlung des Primärenergiebedarfs von Gebäuden. Für die Nachweisführung sind die normativen Randbedingungen nach Tab. 2-2 zu berücksichtigen.

Tab. 2-2: Randbedingungen nach DIN V 4108-6 für MFH

Kenngröße	Randbedingungen
Raumsolltemperatur	19 °C
Nutzwärmebedarf Trinkwarmwasser	$q_w = 12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
Nutzfläche	$A_N = 0,32 V_e$
Beheiztes Luftvolumen	$V = 0,8 V_e$
Interne Wärmegewinne	$q_i = 5 \text{ W}/\text{m}^2$
Klimadaten	Deutschland (Region Potsdam)

Die Berechnung des Jahresheizenergiebedarfs (siehe Gleichung 1) erfolgt mit Hilfe des Jahresheizwärmebedarfs Q_h , des Jahreswärmebedarfs für Trinkwarmwasserbereitung Q_w , der Wärmeverluste der Anlagentechnik Q_t und der Energiemengen Q_r , die durch regenerative Energiesysteme eingebracht werden (Vornorm DIN V 4701-10).

$$Q = Q_h + Q_w + Q_t - Q_r \quad (1)$$

Für die Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfs nach Gleichung 2 werden die Wärmeverluste Q_l und Wärmegewinne Q_g unter Berücksichtigung deren Ausnutzungsgrades η gegenübergestellt.

$$Q_h = Q_l - \eta Q_g \quad (2)$$

Die zu berechnenden Wärmeverluste Q_l setzen sich aus den Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten zusammen.

$$Q_l = 0,024 (H_T + H_V) \cdot (\Theta_i - \Theta_e) t_M \quad (3)$$

Der Transmissionswärmetransferkoeffizient H_T ergibt sich aus den Transmissionswärmeverlusten über die Bauteile der wärmeübertragenden Umfassungsfläche. Die Ermittlung erfolgt über die U-Werte U_i und die zugehörigen Flächen A_i sowie die Anteile für die Wärmebrücken. Der Wärmebrückenzuschlag kann pauschal nach Norm angesetzt oder detailliert berechnet werden. Unter Berücksichtigung der DIN 4108 Bbl. 2 (Norm DIN 4108 Beiblatt 2) und den dort aufgeführten Ausführungsdetails kann ein Wert von $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für den pauschalen Wärmebrückenzuschlag angesetzt werden. Des Weiteren ist ein Temperaturkorrekturfaktor zu berücksichtigen. Dieser ist abhängig von der Lage des Bauteils und der angrenzenden Zone (beheizte Zone, unbeheizte Zone, Außenluft, etc.) sowie dem entsprechenden Wärmestrom.

$$H_T = \sum U_i A_i + H_{WB} \quad (4)$$

Eine Nachtabstaltung bzw. Nachtabenkung des Heizsystems $Q_{i,l}$ führt zu einer Reduzierung der Wärmeverluste und ist bei der Berechnung zu berücksichtigen. Die Wärmegewinne Q_g des Gebäudes berechnen sich nach Gleichung 5 aus den solaren Wärmegewinnen Q_s sowie inneren Wärmegewinnen Q_i .

$$Q_g = 0,024 (\Phi_s + \Phi_i) t_M \quad (5)$$

Der numerische Parameter a ist über die Parameter a_0 und τ_0 mit der Gebäude-Zeitkonstante τ verknüpft. Übersteigen die Wärmegewinne die Wärmeverluste, dann lassen sich die Wärmegewinne nicht mehr vollständig nutzen. Der Ausnutzungsgrad η hängt vom Verhältnis γ des Wärmegewinns zum Wärmeverlust ab. Die Gebäudezeitkonstante τ beschreibt den zeitlichen Verlauf mit dem ein Gebäude auskühlt oder sich aufheizen lässt. Der Ausnutzungsgrad η der Wärmegewinne berechnet sich nach Gleichung 6 wie folgt:

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad (6)$$

mit
$$a = a_0 + \frac{\tau}{\tau_0} \quad (7)$$

und
$$\gamma = \frac{Q_g}{Q_l} \quad (8)$$

Die Differenz zwischen Innenraum- Θ_i und Außentemperatur Θ_e geht als Multiplikator in die Berechnung der Wärmeverluste ein. Somit haben sie über den Jahresheizenergiebedarf Einfluss auf den Primärenergiebedarf Q_P . Dieser wird mit Hilfe der Gesamtanlagenaufwandszahl e_p nach Gleichung 9 berechnet.

$$Q_P = (Q_h + Q_w) e_p \quad (9)$$

Die Berechnung der Anlagenaufwandszahl e_p erfolgt nach DIN V 4701-10. Die Norm stellt drei Verfahren zur Auswahl, die sich durch die Berechnungstiefe unterscheiden. Es stehen das Diagramm-, das Tabellen- und das detaillierte Verfahren zur Auswahl.

Die Basis zur Berechnung der Anlagenaufwandszahl bilden der Heizwärmebedarf Q_h und die Nutzfläche A_N nach EnEV. Die Bestimmung der Anlagenaufwandszahl erfolgt jeweils getrennt voneinander für die Bereiche Trinkwassererwärmung, Lüftung und Heizung. Die Gesamt-Anlagenaufwandszahl e_p ergibt sich aus dieser Summe unter Berücksichtigung der jeweils notwendigen Hilfsenergien.

Eine Besonderheit in der Berechnung ergibt sich, wenn Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung verbaut werden. Im Falle einer Wärmerückgewinnung reduziert sich der Heizwärmebedarf. Nach DIN V 4701-10 wird dies durch die Verringerung des flächenbezogenen Heizwärmebedarfs bei der Berechnung der Anlagenaufwandszahl berücksichtigt. Um eine Doppelbewertung des Wärmegewinnes durch Wärmerückgewinnung auszuschließen, ist dieses Vorgehen nur zulässig, wenn die Wärmerückgewinnung nicht zu einer Absenkung der Lüftungswärmeverluste nach DIN V 4108-6 führt.

Die in der Nachweisführung zugrunde gelegte Heizperiode umfasst 185 Tage pro Jahr. Alternativ kann auch eine individuelle Heizzeit berechnet werden. Hierzu wird die Heizgrenztemperatur Θ_{ed} mit der Außenlufttemperatur in Relation gesetzt. Falls Θ_{ed} größer als Θ_e ist, werden die Tage für die Heizzeit berücksichtigt. Die Heizgrenztemperatur berechnet sich nach Gleichung 10.

$$\Theta_{ed} = \Theta_i - \eta_0 \cdot \frac{Q_{g,M}}{(0,024 H_M t_M)} \quad (10)$$

Über die lineare Interpolation der betreffenden Monate erfolgt die genaue Bestimmung der Heizzeit. Es besteht eine Abhängigkeit der Heizgrenztemperatur und somit der Heizzeit von der Innenraumtemperatur. Je höher die Innenraumtemperatur gewählt wird, desto höher ist auch die Heizgrenztemperatur und somit auch die Heizzeit.

2.1.2 Grundlagen der DIN V 18599

Der integrale Ansatz der DIN V 18599 berücksichtigt die gesamte Bewertung des Gebäudes sowie dessen Nutzung und die Anlagentechnik. Durch die Berechnung aller Wärmequellen und -senken (Heizung, Lüftung, Trinkwarmwasser) finden die Wechselwirkungen untereinander Berücksichtigung. Die Stromaufwendungen für die Erzeugung von Heizung, Lüftung und Trinkwarmwasser werden als Hilfsenergien bei der Berechnung mit einbezogen. Im Vergleich zur DIN V 4108-6 werden zusätzlich zur Ermittlung des Heizenergiebedarfs sowohl der Kühlbedarf als auch der Bedarf der raumluftechnischen Anlagen berücksichtigt (David et al. 2006.). Die DIN V 18599 umfasst 11 Teile, eine Gesamtübersicht gibt *Abb. 2-2*.

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erläutert, werden in DIN V 4108-6 Verluste und Gewinne bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs berücksichtigt. In DIN V 18599 werden entsprechend Wärmesenken und -quellen einbezogen. Als Wärmequellen werden diejenigen Wärmemengen bezeichnet, die eine höhere Temperatur als die Innenraumtemperatur aufweisen. Sie werden dementsprechend einer Zone zugeführt. Im Gegensatz dazu wird von Wärmesenken gesprochen, wenn die Wärmemengen aufgrund einer geringeren Temperatur als die Innenraumtemperatur einer Zone entzogen werden.

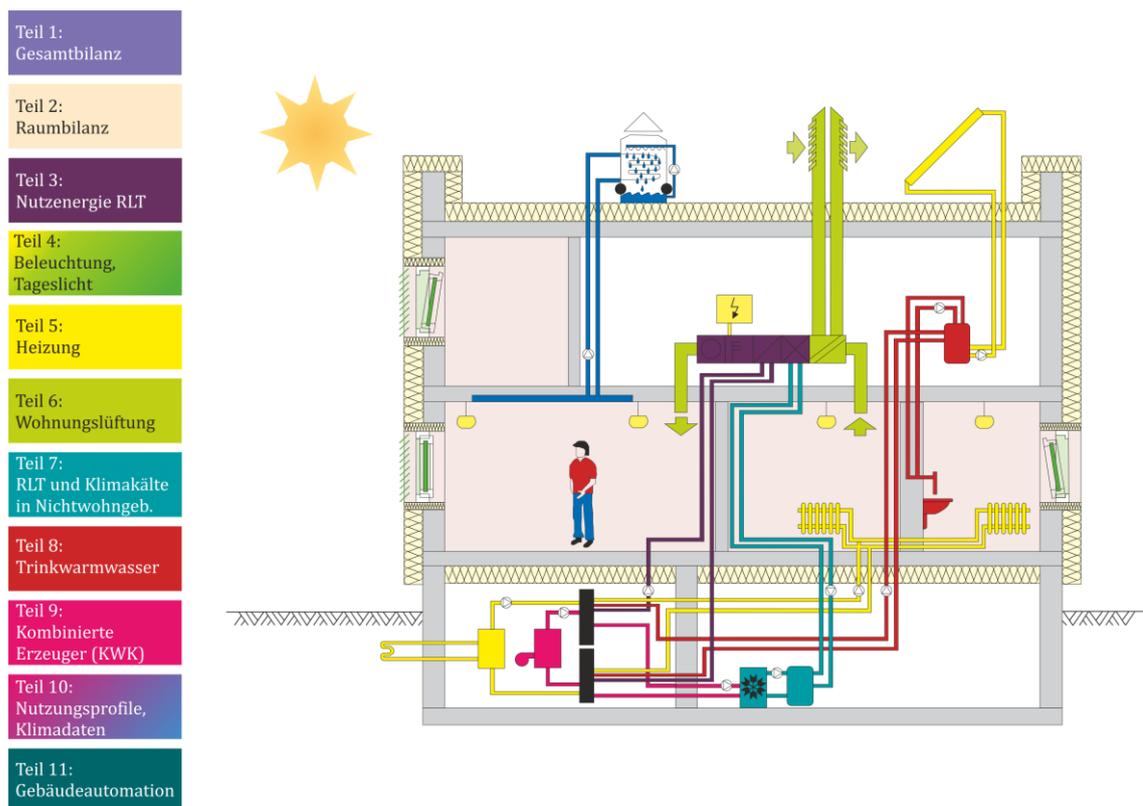


Abb. 2-2: Übersicht der Normenteile der DIN V 18599 und deren Einsatzbereich (DIN V 18599)

Einer der ersten Schritte bei der Nachweisführung nach DIN V 18599 ist die Zonierung des Gebäudes. Hierbei wird das Gebäude in Zonen gleicher Nutzung, Konditionierung und

Ausrichtung aufgeteilt. Im Falle der Berechnung eines Wohnhauses handelt es sich meist um ein Ein-Zonen-Modell. Die wärmeübertragende Umfassungsfläche ist anhand der Außenmaße zu ermitteln. Hierbei werden nur die beheizten Räume berücksichtigt. Anschließend wird der Nutzenergiebedarf für jede Zone berechnet. Die DIN V 18599 gibt Randbedingungen für die Berechnung vor; diese sind in *Tab. 2-3* dargestellt.

Alle Wärmequellen und -senken werden zur Bestimmung der Nutzenergie gegenübergestellt. Die Wärmequellen im Bereich Transmission, Lüftung sowie Solar können einmalig bestimmt werden. Im Fall der Anlagentechnik ist dieses Verfahren iterativ, da die Wärmequellen und -senken von der Nutzenergie abhängig sind. Für sämtliche technische Anlagen müssen die Nutzenergien separat ermittelt werden. Zu den Nutzenergien gehören die Bereiche der Trinkwarmwasserbereitung, Nutzwärme- und -kältebedarf sowie die Luftaufbereitung.

Tab. 2-3: Randbedingungen nach DIN V 18599-10 für MFH

Kenngröße	Randbedingungen
Raumsolltemperatur	20 °C
Nutzwärmebedarf Trinkwarmwasser	$q_{tw} = 16 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (bezogen auf Nutzfläche)
Anteil Gesamtfläche zu beheizende Fläche	$a_{TB} = 0,15$
Raumsolltemperatur, Heizfall	20 °C
Raumsolltemperatur, Kühlfall	25 °C
Interne Wärmegewinne (Personen)	$q_I = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d}) = 3,75 \text{ W}/\text{m}^2$
Nutzungszeiten	Tägliche Betriebszeit Heizung: 17 h Jährliche Nutzungstage: 365
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	4 K
Mindestaußenluftwechsel	$n_{\text{nutz}} = 0,5 \text{ h}^{-1}$
Mittlerer Anlagenluftwechsel	$n_{\text{mech}} = 0,4 \text{ h}^{-1}$
Klimadaten	Deutschland (Region Potsdam)

Die Berechnung der Nutzenergie erfolgt über den Heizwärme und Kühlbedarf und setzt sich dabei aus den relevanten Wärmequellen und -senken zusammen. Die Wärmequellen und -senken lassen sich vier Kategorien zuordnen. Dies sind Transmissions- Q_T und Lüftungswärmeströme Q_V sowie solare Fremdwärme- bzw. Kaltwärmemengen Q_S und innere Wärmequellen und -senken Q_I .

Die Berechnung der Wärmequellen und -senken erfolgt nach Gleichung 11.

$$Q_{\text{sink/source}} = Q_T + Q_V + Q_I + Q_S \quad (11)$$

Durch die Aufsummierung aller Senken und Quellen einer Zone ergibt sich der jeweilige Nutzwärmebedarf nach Gleichung 12.

$$Q_h = Q_{\text{sink}} - \eta Q_{\text{source}} \quad (12)$$

Anschließend wird der so bestimmte Nutzenergiebedarf der Zone auf die Versorgungssysteme aufgeteilt. Durch die Aufsummierung der technischen Verluste in den Bereichen der Übergabe, Verteilung und Speicherung zum Nutzenergiebedarf ergibt sich der Endenergiebedarf. Der daraus resultierende Endenergiebedarf wird mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor bewertet und ergibt abschließend den Primärenergiebedarf (Vornorm DIN V 18599-1).

Der Einfluss der Innenraumtemperatur auf die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste ist auch bei der Berechnung nach DIN V 18599 gegeben. Die Quellen und Senken der Transmission und Lüftung berechnen sich wie folgt.

$$Q_T = \sum H_{T,j} (\vartheta_i - \vartheta_j) t \quad (13)$$

$$Q_V = \sum H_{V,k} (\vartheta_i - \vartheta_k) t \quad (14)$$

Die Transmissionswärmequellen und -senken setzen sich dabei aus einem Anteil nach außen $Q_{T,D}$ und einem Anteil zu unbeheizten Zonen $Q_{T,u}$ zusammen. Die Temperatur ϑ_u der unbeheizten Zone ist abhängig von der Innenraumtemperatur ϑ_i und berechnet sich nach Gleichung 15.

$$\vartheta_u = \vartheta_i - F_X (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad (15)$$

In die berechneten Quellen und Senken im Bereich Transmission $Q_{T,D}$ und Lüftung Q_V geht die Innenraumtemperatur ϑ_i als Multiplikator ein. Unter Berücksichtigung der inneren Q_i sowie der solaren Wärmequellen Q_S und der Transmissionswärmeverluste Q_T sowie der Lüftungswärmeverluste Q_V werden anschließend der Heizwärmebedarf als auch der Primär- und Endenergiebedarf bestimmt.

2.1.3 Witterungsbereinigung von Verbrauchsdaten

Verbrauchsdaten dürfen nicht direkt mit den berechneten Bedarfsdaten in Vergleich gesetzt werden. Um eine Aussage bzgl. einer möglichen Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch treffen zu können, müssen die Verbrauchsdaten klimabereinigt werden (Vornorm DIN V 18599 Beiblatt 1). Die Berechnungen nach EnEV werden mit den Klimadaten der Region Potsdam durchgeführt. Die gemessenen Verbrauchsdaten beruhen im Gegensatz dazu auf den realen Wetterdaten vor Ort. Die Witterungsbereinigung erfolgt anhand der DIN V 18599 in Verbindung mit der VDI 3807.

$$Q_{h,bereinigt} = Q_{h,gemessen} \cdot \frac{G_{t,Potsdam}}{G_{t,gemessen}} \quad (16)$$

Die gemessenen Gradtagszahlen $G_{t,gemessen}$ werden über die gemessenen Verbrauchsdaten bestimmt. Vor der Witterungsbereinigung ist zu beachten, dass die Norminnentemperatur

Θ_i zwischen den Berechnungsgängen nach DIN V 4108-6 und DIN V 18599 voneinander abweicht.

$$G_{t,\text{gemessen}} = (\Theta_i - t_m) 1d \quad (17)$$

Die Heizgrenztemperatur liegt bei 15 °C. Für die Witterungsbereinigung werden nur Tagesmitteltemperaturen t_m berücksichtigt, die unter dieser Grenze liegen. Anschließend werden die so berechneten Gradtagszahlen für den Auswertungszeitraum eines Jahres aufaddiert.

Im Anhang der VDI 3807 (VDI 3807 Blatt 1) sind die Gradtagszahlen der Region Potsdam als Mittelwerte des Langzeitklimas dieses Standortes hinterlegt. Für die Heizgrenze von 15 °C und einer Innenraumtemperatur von 20 °C ergibt sich für Potsdam eine mittlere Gradtagszahl von 4.025 Kd/a. Diese Gradtagszahl ist ausschlaggebend für die Berechnungen nach DIN V 18599. Aufgrund der geringeren Innenraumtemperatur von 19 °C beträgt die Gradtagszahl für Potsdam für die Berechnungen nach DIN V 4108-6 lediglich 3.711 Kd/a.

2.1.4 Definition der Energieperformancelücke (EPL)

Wie aus einigen Veröffentlichungen (Hens 2010; Menezes et al. 2012) zu entnehmen ist, können die gemessenen Energieverbräuche deutlich von den Energiebedarfsberechnungen abweichen und somit dazu führen, dass die berechneten Energieeinsparungen nicht erzielt werden. Dieses Phänomen wird in der Literatur (Hirst und Brown 1990; Galvin 2013b) als „Energy Performance Gap“ (deutsch: Energieperformancelücke, EPL) bezeichnet. Gebäude mit komplexer, anspruchsvoller Anlagentechnik tendieren dazu, einen erhöhten Energieverbrauch aufzuweisen, da der Nutzereinfluss hier deutlichere Auswirkungen mit sich bringen kann (Virote und Neves-Silva 2012).

Die Energieperformancelücke gibt die prozentuale Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Energieverbrauch wider (siehe Gleichung 18).

$$EPL = \frac{Q_{h,\text{Verbrauch}} - Q_{h,\text{Bedarf}}}{Q_{h,\text{Bedarf}}} \cdot 100 \% \quad (18)$$

In den weiteren Analysen wird die *EPL* für den Bereich der Heizwärme (an der Wohnungsgrenze) ermittelt. In der Bilanzierung des Heizwärmebedarfs werden die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sowie die internen und solaren Gewinne berücksichtigt. Dieser Wert eignet sich daher für die Bewertung des Nutzerverhaltens und die somit entstehende Energieperformancelücke.

2.2 Baukonstruktive und anlagentechnische Sanierungsmaßnahmen

2.2.1 Transmissionswärmeverluste im Gebäudebestand und mögliche Sanierungsmaßnahmen

Hinsichtlich ihres Energieverbrauchs weisen die Gebäude der unterschiedlichen Baualterklassen typische Schwächen auf. Die möglichen Einsparpotentiale durch nachträgliche Dämmmaßnahmen an der wärmeübertragenden Umfassungsfläche und den Austausch der Anlagentechnik fallen je nach Ausgangssituation unterschiedlich hoch aus. Wie diversen Veröffentlichungen zu entnehmen ist, lassen sich die Verluste durch Wärmedämmmaßnahmen um bis zu 65 - 75 % reduzieren (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2011).

Die Mehrfamilienhäuser der 50/60er Jahre wurden vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung erstellt und weisen dementsprechend hohe Transmissionswärmeverluste sowie einen hohen Primärenergiebedarf auf (IWU 2009). Aufgrund der wirtschaftlichen Notwendigkeit und der Wohnungsnot wurde darauf geachtet, dass zur Verfügung stehende Material ressourceneffizient einzusetzen. Daraus resultieren entsprechend dünne Außenwandkonstruktionen, einfach konstruierte Fenster und letztendlich ungedämmte Dächer bzw. oberste Geschoss- und Kellerdecken.

Abb. 2-3 ist die Gegenüberstellung der jeweiligen durchschnittlichen Energieverluste über die einzelnen Bauteile der wärmeübertragenden Umfassungsfläche zu entnehmen. Die größten Transmissionswärmeverluste mit 20 % sind für die Außenwand ablesbar. Auf die Fenster entfallen 17 %, auf die Kellerdecke 5 % und auf die oberste Geschossdecke bzw. das Dach 8 % der Verluste. Hinzu kommen knapp 27 %, die über Lüftungswärmeverluste verloren gehen.

Die Gebäudestruktur mit Nischen sowie vor- und rückspringenden Fassadenelementen führt zu einer vergrößerten wärmeübertragenden Umfassungsfläche und damit einhergehend zu einem schlechten A/V-Verhältnis und hohem Heizenergieverbrauch. Aus damaliger Sicht und den geringen Energiekosten wurde kein Augenmerk auf die Ausführung einer energieeffizienten Außenhaut gelegt.

Dies stellt sich aus heutiger Sicht völlig anders dar. Die Mehrfamilienhäuser der 50/60er Jahre sind in großer Anzahl vorhanden und haben mittlerweile ein Nutzungsalter erreicht, dass eine grundlegende Modernisierung erforderlich macht. Die Sanierungsmaßnahmen werden in einem gewissen Teilbereich zu sowieso notwendigen Maßnahmen (bspw. Nachbesserungen am Außenputz) und lassen sich daher wirtschaftlich darstellen.

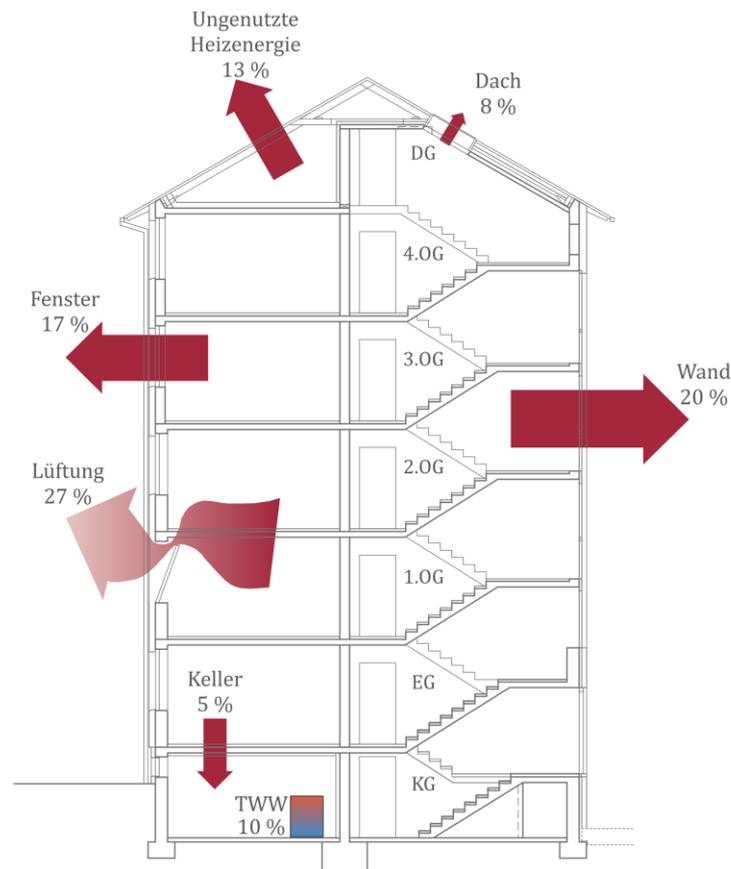


Abb. 2-3: Gegenüberstellung der Energieverluste von Mehrfamilienhäusern der 60er Jahre am Beispiel von Riegel 2 des Forschungsvorhabens Karlsruhe-Rintheim

Trotz der großen politischen Bedeutung der energetischen Gebäudesanierung gibt es derzeit keine aktuell verfügbaren Quellen, die die jährlichen energetischen Sanierungsraten für den deutschen Gebäudebestand aufzeigen. Die Veröffentlichung des IWU aus dem Jahre 2010 mit dem Titel „Datenbasis Gebäudebestand“ (Institut Wohnen und Umwelt GmbH 2010) gibt einen Überblick über momentane Sanierungsraten. Die Studie gibt einen Einblick in die Gesamtsanierungsrate der wärmeübertragenden Umfassungsfläche im deutschen Wohngebäudebestand. Es werden dazu die Bereiche Außenwand, Dach/Oberste Geschossdecke (OGD), Fußboden/Kellerdecke (KD) und Fenster gegenübergestellt.

Für den Betrachtungszeitraum 2005 bis 2008 konnte lediglich eine Gesamtsanierungsrate von 0,8 % pro Jahr für Maßnahmen an der Gebäudehülle im Wohngebäudebestand ermittelt werden. Das Ziel der Sanierungsrate von 2 % konnte nicht erreicht werden (Institut Wohnen und Umwelt GmbH 2010). Für den Altbaubestand bis zum Jahr 1978 konnte eine Sanierungsrate von 1,1 % festgestellt werden.

Abb. 2-4 zeigt die energetische Sanierungsrate für die drei Bauteile Außenwand, Dach/oberste Geschossdecke und Fußboden/Kellerdecke. Die energetischen Sanierungsraten unterscheiden sich erheblich. Die höchste Sanierungsrate mit ca. 1,5 % ergibt sich für die Dämmung des Daches bzw. der obersten Geschossdecke. Etwa die Hälfte, also knapp

0,8 %, lassen sich für die Dämmung der Außenwand ermitteln. Die geringste Sanierungsaktivität mit ca. 0,3 % stellt sich für den Fußboden bzw. die Kellerdecke dar.

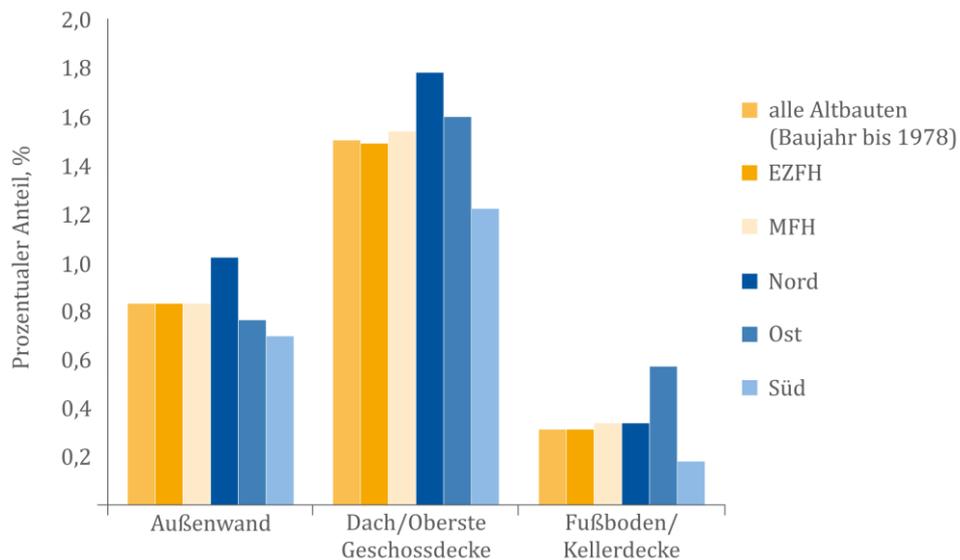


Abb. 2-4: Sanierungsraten 2005 bis 2008 in Altbauten (Baujahr bis 1978) für verschiedene Bauteile sowie nach Gebäudeart und Region (in Anlehnung an IWU 2010)

Aktuelle Veröffentlichungen der dena zeigen weiterhin, dass sich die von der Bundesregierung angestrebte Verdopplung der jährlichen Sanierungsrate von 1 auf 2 % weiterhin nicht einstellt (dena 2017). Ein weiteres Indiz für die schwache Dynamik im Sanierungsmarkt ist die Entwicklung des Wärmeverbrauchs. Bei Fortschreibung der bisherigen Entwicklungen, wird das Zwischenziel, den Wärmebedarf der Gebäude bis 2020 um 20 % zu senken, um etwa zwei Jahre verfehlt. Klimabereinigkt konnte der Wärmebedarf von 2008 bis 2015 um 9,7 % reduziert werden (Pehnt und Nast 2016).

2.2.2 Anlagenverluste im Gebäudebestand und mögliche Sanierungsmaßnahmen

Wie Abb. 2-3 zu entnehmen ist, entstehen neben den Transmissionswärmeverlusten über die Gebäudehülle ebenfalls Verluste im Bereich der Anlagentechnik (Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, Lüftung). Ein Grund für die niedrige Energieeffizienz des Wohngebäudebestandes liegt in der veralteten Heizungstechnik und den unzureichend gedämmten Verteilrohren. Eine Studie des BDH gibt darüber Auskunft, dass lediglich 13 % der Bestandswohngebäude über eine Heizungsanlage auf dem Stand der Technik (18 Mio. Geräte) verfügen (Interessengemeinschaft Energie, Umwelt GmbH 2011).

Allein über die energetische Modernisierung des zu 87 % technologisch veralteten Anlagenbestands könnte der größte Teil der im Gebäudebestand bestehenden Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenziale erschlossen werden. Im Vergleich zu Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle zeichnen sich anlagentechnische Modernisierungen in der Regel durch ein günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis aus. Im Detail betrachtet liegt die Moder-

nisierungsrate in diesem Bereich bei 3 % pro Jahr (Interessengemeinschaft Energie, Umwelt GmbH 2011). Trotz dieser leicht erhöhten Werte gegenüber der Sanierungsquote in Deutschland dauert es über 30 Jahre bis der Anlagenbestand modernisiert und auf den jeweiligen Stand der Technik gebracht wurde.

Im Zuge einer Altbausanierung stehen für sämtliche Energieträger optimale Systemlösungen der Heizungs- und Lüftungstechnik zur Verfügung. Die individuelle Lösung für das Bestandsgebäude hängt von flankierenden Rahmenbedingungen ab. Allen voran sind die Heizlast des Gebäudes und damit einhergehend die Dimensionierung des Wärmeerzeugers zu nennen; außerdem spielen der Verwendungszweck, die Gebäudeausrichtung und die Wünsche des Bauherrn eine Rolle.

Der Systemgedanke sollte bei allen Überlegungen im Vordergrund stehen. Nur wenn der Wärmeerzeuger mit den übrigen Komponenten (Wärmeverteilung, -übergabe, etc.) des Heizungssystems optimal auf einander abgestimmt sind, können die Energieeinsparpotentiale gehoben werden. Weiterhin ist die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs unverzichtbar. Nur so lassen sich die Absenkung der System- und Raumtemperaturen und eine hohe Regelfähigkeit des Heizungssystems erreichen.

Die energetische Modernisierung der Gebäudehülle führt nach fachgerechter Ausführung zu einer luftdichten Gebäudehülle. Im Gegensatz zum Altbau ist kein unkontrollierter, häufig überhöhter Luftaustausch durch Fugen und Ritzen mehr vorhanden. Die Gebäudehülle ist so dicht, dass der erforderliche „hygienische Mindestluftwechsel“ nicht durch aktives Lüften seitens der Bewohner erreicht werden kann. Es sind ergänzende technische Maßnahmen notwendig (Interessengemeinschaft Energie, Umwelt GmbH 2013).

Aufgrund der Lebensgewohnheiten der Nutzer ist ein regelmäßiges bzw. angemessenes Fensterlüften (z. B. alle zwei Stunden fünf Minuten) nicht möglich. Dauerlüftung durch gekippte Fenster konterkariert die Energiesparmaßnahmen durch baulichen Wärmeschutz. Durch Lüftungssysteme wird das Risiko der Schimmelpilzbildung reduziert und außerdem ein nutzerunabhängiger Luftwechsel zur Sicherstellung des hygienischen Mindestluftwechsels gewährleistet. Eine Lüftungstechnische Anlage ist somit ein wichtiger Bestandteil energiesparender Gebäude und führt zusätzlich zu einem Werterhalt der Immobilie (Interessengemeinschaft Energie, Umwelt GmbH 2013).

Laut KfW-Statistik wurden im Jahr 2014 mehr Einzelmaßnahmen als Komplettsanierungen durchgeführt. Auf diesen Trend sind die KfW sowie die bafa eingegangen und ermöglichen jetzt auch Sanierungsmaßnahmen in einem Paket, welche zeitlich erst nach einander umgesetzt werden. Der Austausch der Heizkessel führt die Liste der häufigsten Einzelmaßnahmen an, gefolgt von einem Austausch der Fenster. Hierbei handelt es sich finanziell um Investitionen im kleinen fünfstelligen Bereich. Auf Platz drei und vier sind Einzelmaßnahmen, mit einem größeren finanziellen Aufwand, wie die Dach- und Fassadendämmung zu finden. Den Abschluss der Liste bildet die geringinvestive Maßnahme der Heizungsoptimierung, die gerade im Altbau zu einer großen Heizkosteneinsparung führen kann.

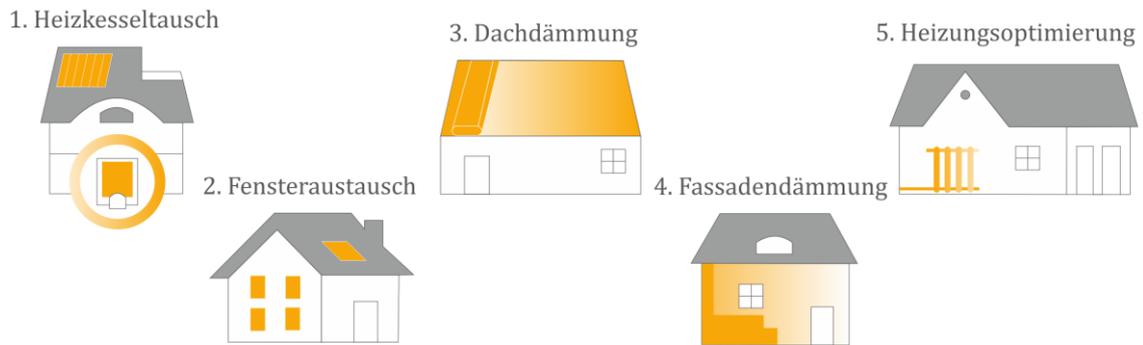


Abb. 2-5: Die fünf häufigsten energetischen Modernisierungen (Einzelmaßnahmen im Jahr 2014 laut KfW-Statistik)

2.3 Abweichung zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten

Mit der Novellierung der EnEV 2014 wurden die Vorschriften zur Erstellung von Energieausweisen für Gebäude verschärft. Im Falle eines Energiebedarfsausweises beruhen die Daten auf den Berechnungsergebnissen nach den zulässigen Verfahren auf Basis der DIN V 4108-6 bzw. DIN V 18599. Im Falle einer Vermietung, Verpachtung oder Verkauf von Gebäuden ist ein Energieausweis vorzulegen. Seit der Novellierung der EnEV ist bereits in der Immobilienanzeige der Energieverbrauchs- bzw. -bedarfswert für das Objekt auszuweisen. Über diese Angaben erhalten Mieter und Käufer einen Einblick in den energetischen Zustand des Gebäudes und die zu erwartenden Energiekosten. Aus vielen Studien und Forschungsberichten ist allerdings zu entnehmen, dass die angegebenen Bedarfswerte häufig von den tatsächlichen Verbrauchswerten abweichen.

Die Energieausweise von 63 Gebäuden wertet eine Studie der deutschen Energieagentur GmbH (dena) aus dem Jahr 2013 aus. Im Zuge der Arbeiten wird die berechnete Energieeinsparung auf Basis des Energiebedarfs für die ausgewählten Objekte mit dem gemessenen Energieverbrauch gegenübergestellt. In den meisten Fällen ergibt sich eine Abweichung von bis zu +/- 10 % zwischen den Verbrauchs- und Bedarfswerten. Lediglich bei einem Objekt kann ein deutlich geringerer Verbrauch und bei fünf weiteren Gebäuden ein wesentlich höherer Verbrauch festgestellt werden (Stolte et al. 2013a).

Das Energieeinsparpotential von technischen Optimierungen an Heizungsanlagen untersucht die OPTIMUS-Gruppe. Hierzu wird für 93 Ein- und Mehrfamilienhäuser der witterungsbereinigte Heizenergieverbrauch dem Heizenergiebedarf gegenübergestellt. Es konnte festgestellt werden, dass im Mittel aller betrachteten Gebäude der Heizenergieverbrauch um 26 % unter dem Heizenergiebedarf liegt (Jagnow und Wolff 2008). Für die Analyse wurden die Gebäude in drei Baualtersklassen unterteilt: Gebäude mit einem Erstellungsdatum bis 1977, von 1978 bis 1994 und ab 1995. Für die Mehrfamilienhäuser ab 1995 tritt die Überschätzung des Heizenergiebedarfs nicht auf, vielmehr liegt der Bedarfswert 22 % unter dem Verbrauchswert. Es kann festgestellt werden, dass die Diskrepanz zwischen Bedarf und Verbrauch mit zunehmender energetischer Qualität der Gebäude zunimmt (Oschatz, 2009).

Im Jahr 2005 konnten im Zuge des dena-Feldversuchs 1.082 Energieausweise und deren Gebäude evaluiert werden. Verglichen wurden der Endenergiebedarf und -verbrauch. Die Auswertung ergab, dass für 66 % der untersuchten Gebäude eine Überschätzung des Bedarfs vorlag. Die Abweichung zwischen Endenergiebedarf und -verbrauch fällt umso geringer aus, je mehr Wohneinheiten das Gebäude beinhaltet (Gruber et al., 2005).

Die IFEU-Studie aus dem Jahr 2005 baut auf dem gleichen Datensatz wie der dena-Feldversuch auf. Ergänzend werden hier die Verbrauchsdaten von sieben Mehrfamilienhäusern wohnungsweise mit den Bedarfsdaten gegenübergestellt. Es ergeben sich Abweichungen zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten von -49 % bis zu +55 % (Hertle et al., 2005).

Die Verbrauchswerte von 60.000 Mieteinheiten wurden in der Untersuchung der Gesellschaft für Bau- und Stadtentwicklung mbH Hamburg im Jahr 2009 den Bedarfsdaten gegenübergestellt (Raschper 2010). Als Ergebnis lässt sich eine Bedarfsüberschreitung von 20 bis 30 kWh/(m²a) feststellen.

Die gewonnenen Ergebnisse dieser Studien zeigen, dass sich keine allgemeingültige Aussage zur systematischen Abweichung zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten treffen lässt, da eine große Streuung der Werte auftritt.

Die Gründe für die Abweichung zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten sind vielfältig, daher befassen sich einige Studien mit der detaillierten Ursachenforschung (Stolte et al. 2013b; Oschatz 2009; Raschper 2010). Zusammenfassend lassen sich folgende Gründe für die Diskrepanz zwischen berechneten und gemessenen Werten anführen; unzureichende Klimabereinigung, abweichende bauliche Ausführung, unterschiedliche Bilanzgrenzen, anlagentechnische Mängel, Ungenauigkeiten bei der Erfassung von Verbrauchsdaten und abweichendes Nutzerverhalten.

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben, müssen die Verbrauchsdaten witterungsbereinigt werden, um sie mit den Bedarfsdaten vergleichen zu können. Die gültige Normung geht dabei von einer Heizgrenztemperatur von 15 °C aus, bei energetisch sanierten Gebäuden kann dieser Wert deutlich nach unten abweichen. Aktuelle Veröffentlichungen legen den Schluss nahe, dass bei Niedrigenergiehäusern eher mit 12 °C und bei Passivhäusern mit 10 °C zu rechnen ist (Stolte et al. 2013b). Bei der standardisierten Witterungsbereinigung werden die solaren Gewinne außer Acht gelassen, diese haben neben der Außentemperatur ebenfalls Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch. Es ergeben sich Abweichung bei den Heizgradtagen von bis zu 15 % und ein weiteres Fehlerpotential (Erhorn 2007).

Zur Erstellung einer EnEV-Berechnung bzw. eines Energieausweises werden die baulichen Daten sowohl aus Planunterlagen als auch einem Aufmaß entnommen oder lediglich durch Annahmen ersetzt. Abweichungen können hier insbesondere bei der Annahme der U-Werte und der Ausführung der Wärmebrücken entstehen (Oschatz 2009). Es bleibt weiterhin zu berücksichtigen, dass die Energiebezugsfläche nicht mit der Wohnfläche gleichgesetzt werden kann. Durch die getroffenen Vereinfachungen können sich Abweichungen in der Größenordnung von 50 % der Bedarfswerte ergeben (Erhorn 2007).

Eine mangelhaft ausgeführte Dämmung der Leitungen oder gar fehlende Dämmung, sowie Fehleinstellungen bei Pumpen und Heizkesseln, können zu anlagentechnischen Mängeln führen. Durch die normativen Ansätze in der Berechnung können somit ebenfalls Abweichungen bei der Bedarfsermittlung entstehen.

Unterschiedliche Bilanzgrenzen bei der Ermittlung der Bedarfswerte und der Bilanzierung der Verbrauchswerte führen ebenso zu Abweichungen zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten (Oschatz 2009). Des Weiteren kann die Erfassung der Verbrauchsdaten fehlerbehaftet sein. Die Messgenauigkeit ist je nach Gerät und Hersteller unterschiedlich und führt somit ebenso zu abweichenden Messdaten.

Neben den technischen Abweichungen ergeben sich in allen ausgewerteten Studien auch Abweichungen aus dem Nutzerverhalten gegenüber den normativen Vorgaben. Dazu zählen unter anderem die Belegung der Wohnungen und die damit einhergehenden internen Gewinne, das individuelle Lüftungsverhalten und die eingestellten Innenraumtemperaturen.

Die Studien geben Auskunft darüber, dass ein abweichendes Nutzerverhalten bei unterschiedlichen Personengruppen ablesbar ist. So beheizen Berufstätige ihre Wohnung aufgrund der hohen Abwesenheit deutlich weniger als beispielsweise Senioren oder Familien mit kleinen Kindern (Stolte et al. 2013b)). Raschper (2010) stellt in seiner Studie fest, dass das Lüftungsverhalten einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat und das individuelle Lüftungsverhalten deutlich von den normativen Berechnungsgrundlagen abweicht.

Neben dem Lüftungsverhalten hat auch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen einen Einfluss auf den Energiebedarf. Eine Anhebung der Innenraumtemperatur um 1 K führt zu einer 8 %-igen Erhöhung des Energiebedarfs (Raschper 2010). Eine mittlere Innenraumtemperatur von 18,5 °C in den Wintermonaten (mittlere Standardabweichung 4 K) konnte von den Brunata-Metrona-Wärmediensten aus 3,7 Millionen Messungen ermittelt werden. Eine mittlere Innenraumtemperatur von ca. 20 °C (Standardabweichung 2,5 K) ergeben die Messdaten von 67 Niedrigenergiehäusern des Fraunhofer-Institutes (Schröder et al.).

Energieeffiziente Gebäude weisen zu einem Viertel Temperaturen über 19 °C in den Wohnräumen auf. In älteren Gebäuden liegen die mittleren Wohnraumtemperaturen eher unter 19 °C (Schröder et al.). Die Daten von 22 Passivhäusern und 104 Niedrigenergiehäusern werden in einer Studie des IWU gegenübergestellt. Die Mittelwerte der gemessenen Innenraumtemperaturen unterscheiden sich bei den unterschiedlichen Ausführungsarten nur marginal. Während bei den Passivhäusern 20,4 °C als Innenraumtemperatur gemessen wurde, lag der Wert bei den Niedrigenergiehäusern bei 20,2 °C (Loga et al. 2003). Im Mittel kann eine Erhöhung der Innenraumtemperaturen von 1,0 bis 1,5 K beim Übergang von unsanierterter zu sanierten Objekten festgestellt werden. Der Anteil der verwendeten Heizflächen in den Wintermonaten reduziert sich währenddessen von 40 auf 30 % (Schröder et

al.). Es zeigt sich weiterhin eine homogenere Temperaturverteilung innerhalb der energieeffizienten Gebäude aufgrund der geringeren Transmissionswärmeverluste und den damit einhergehenden höheren Innenoberflächentemperaturen.

Neben dem baulichen Standard ist die Innenraumtemperatur laut einer Studie des IWU einer der Faktoren mit dem größten Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch. Es muss allerdings angemerkt werden, dass in dieser Studie kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden konnte (Ebel et al. 2003). Die Innenraumtemperatur kann erst unter Berücksichtigung weiteren Einflussfaktoren auf den Heizwärmeverbrauch bewertet werden. Der Temperaturgradient von Innenluft- und Außenlufttemperatur ist ausschlaggebend für die Bestimmung des Heizenergiekonsums (Schröder et al.).

Neben dem Heizenergiekonsum hat der Temperaturgradient auch einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf. Die Auswertungen ergeben, dass die Außenlufttemperaturen einen stärkeren Einfluss ausüben als die Innenlufttemperaturen. Um bis zu 30 % sinkt der Energiebedarf bei einer Erhöhung der Außenlufttemperaturen um 2 °C (Olonschek et al. 2011). Erhöhen sich sowohl Außenluft- als auch Innenlufttemperatur, so übersteigt der bedarfssenkende Effekt von Θ_e den bedarfstreibenden Effekt von Θ_i (Elsland et al. 2011).

Ein Vergleich der vorliegenden Studien zeigt, dass sich kein einheitliches Bild für die Abweichung zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten ergibt. Von Studie zu Studie unterscheiden sich die Abweichungen sowohl in ihrer Höhe als auch in ihrem Vorzeichen. Allen Studien zufolge hat das Nutzerverhalten, welches durch die Berechnungsvorgaben nicht eindeutig abgebildet werden kann, einen deutlichen Einfluss auf die Verbrauchswerte und damit einhergehend auf die Diskrepanz zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten. In den meisten der hier aufgeführten Studien wird neben den individuellen Innenraumtemperaturen auch das Lüftungsverhalten als großer Einflussfaktor angeführt. Festzuhalten bleibt außerdem, dass mit steigender energetischer Qualität des Gebäudes die Innenraumtemperaturen ansteigen.

3 Sanierung eines typischen Wohngebäudes der 60er Jahre

3.1 Ausgangszustand der Gebäude

Die Basis für die Untersuchung von energieeffizienten Modernisierungen bildet das Forschungsprojekt „Quartierskonzept Energieeffizientes Rintheim“, welches im Rahmen der Förderinitiative „Energieeffiziente Stadt“ (EnEff:Stadt) umgesetzt wurde.

Der hier detailliert vorgestellte Teil des Vorhabens befasst sich mit der energetischen Modernisierung von drei Gebäuderiegeln aus den 1950/60er Jahren. Diese Gebäuderiegel sind im Besitz der VOLKSWOHNUNG Karlsruhe (VoWo). Die Auslegung sowie Planung der Anlagentechnik wurde durch das Ingenieurbüro KW2-Ingenieure in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik durchgeführt. Die TGA-Pläne, die im Weiteren zum besseren Verständnis in der Arbeit enthalten sind, wurden der Ausführungsplanung der KW2-Ingenieure entnommen und stark vereinfacht dargestellt. Ergänzende Informationen zum Gesamt-Forschungsvorhaben sind in (Jank und Kuklinski 2015) sowie in (Cali et al. 2016a; Cali 2016; Müller et al. 2016) zu finden.



Abb. 3-1: Quartier in Karlsruhe-Rintheimer Feld aus nördlicher Richtung
(Quelle: VOLKSWOHNUNG Karlsruhe)

Das Quartier „Rintheimer Feld“ (siehe Abb. 3-1) ist im nördlichen Bereich eine typische Großwohnsiedlung der Nachkriegszeit. Der südliche Teil des Quartiers stammt hingegen

aus den 60er Jahren. Dieser Teil ist trotz der verbesserten Heizungstechnik und veränderten Stadtarchitektur hinsichtlich der energetischen Qualität eher schlechter als die älteren Gebäude (Jank und Kuklinski 2015). Im Zeitraum zwischen 1998 und 2001 wurden neun der 30 Gebäude der VOLKSWOHNUNG energetisch modernisiert. In den Folgejahren 2007 bis 2011 wurden weitere sieben Gebäude voll- und drei teilsaniert.

Die fünfstöckigen Gebäuderiegel wurden in den 50/60er Jahren erbaut und verfügen über jeweils drei Eingänge. Über jeden Eingang werden pro Geschoss jeweils zwei spiegelsymmetrische Wohnungen, in Summe 10 Wohnungen, erschlossen. Die Ausrichtung und Lage der Gebäuderiegel ist *Abb. 3-4* zu entnehmen. Die Gebäuderiegel mit ihren jeweils drei Eingängen sind identisch ausgerichtet und verfügen über gleiche Abmessungen.

Die Längsfassaden sind 51,6 m lang und die Giebelfassaden 10,3 m breit. Hieraus resultiert eine überbaute Fläche von 533,8 m². Den oberen Abschluss der Gebäude bildet ein unbeheiztes Satteldach. Diese Daten sind die Grundlage zur Bestimmung der Hüllfläche, der Nettogrundfläche und des beheizten Volumens. Die detaillierten Angaben zu Flächen, Volumina und EnEV-spezifischen Parametern sind *Tab. 3-1* zu entnehmen.

Tab. 3-1: Eckdaten der zu sanierenden Gebäuderiegel

Eckdaten	Größe	Einheit
Wohnfläche (gesamt)	2.058,90	m ²
Gebäudenutzfläche nach EnEV A_n	2.275,50	m ²
Wärmeübertragende Umfassungsfläche	3.050,26	m ²
- Oberste Geschossdecke	533,85	m ²
- Außenwandfläche	1.201,56	m ²
- Fensterfläche	265,51	m ²
- Innenwandfläche	455,49	m ²
- Türfläche	60,00	m ²
- Kellergeschossdecke	533,85	m ²
Beheiztes Gebäudevolumen	7.110,94	m ³

Die knapp 70 m² großen Wohnungen sind als Drei-Zimmer-Wohnungen ausgeführt. Von einem kleinen zentralen Flur werden alle Zimmer erschlossen. An das Wohnzimmer grenzt ein kleiner Balkon mit einer Tiefe von 60 cm an. Die Fassade ist baualtersspezifisch als Lochfassade ausgeführt. Den unteren Gebäudeabschluss bildet der unbeheizte Keller.

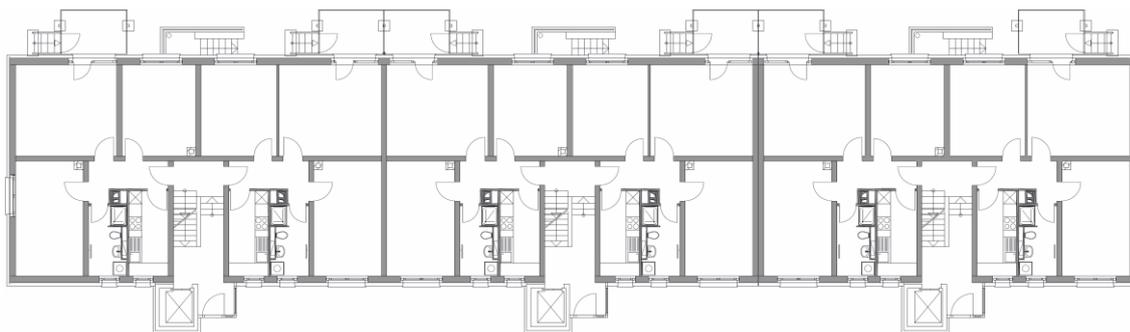


Abb. 3-2: Grundriss eines Riegels mit seinen drei Eingängen

Die Substanz der Außenwände bildet das 24 bis 30 cm dicke monolithische Mauerwerk, welches beidseitig verputzt ist. Der U-Wert für die Außenwandkonstruktion beläuft sich auf $2,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Sowohl die Kellergeschossdecke als auch die oberste Geschossdecke besteht aus Stahlbeton und weist einen U-Wert von $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf. Die Wohnungstrenn- und Treppenhauswände wurden ebenfalls monolithisch mit einer Dicke von 24 cm ausgeführt. Der rechnerische U-Wert beläuft sich auf $1,79 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

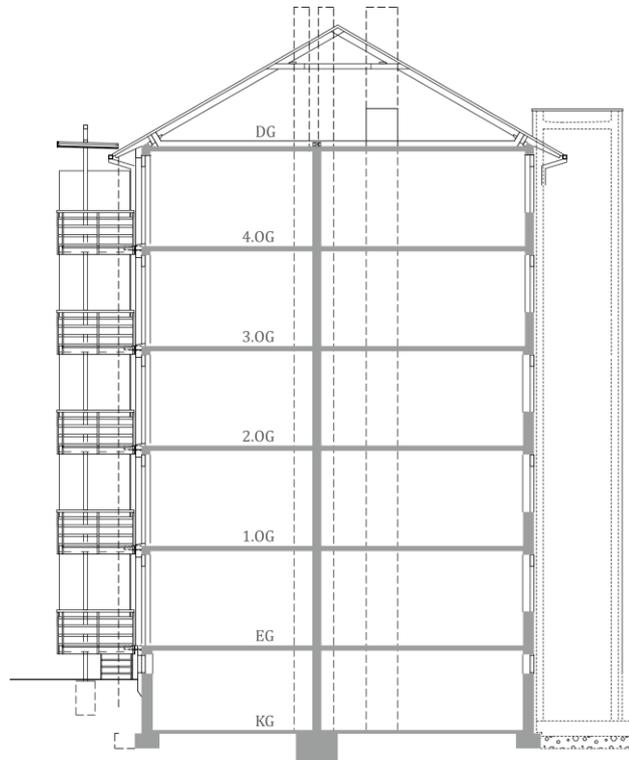


Abb. 3-3: Querschnitt durch einen Riegel

Bereits in der 80er Jahren hat eine Teilsanierung der Gebäudehülle stattgefunden. Zu diesem Zweck wurden die Fenster durch Kunststofffenster mit Zwei-Scheiben-Isolierverglasung ersetzt. Mit einem Rahmenanteil von 30 % ergibt sich ein rechnerischer mittlerer U_w von $3,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Des Weiteren wurde die südliche Giebelwand mit einer 4 cm starken Dämmschicht (WLG 040) versehen.

Vor der umfangreichen Sanierung wurden die Wohnungen dezentral beheizt; manche Wohnungen über Gasheizer oder sogar Kohle-Einzel-Öfen, teilweise sogar raumweise. Ein Teil der Mieter ist auf eigene Kosten auf eine Gasetagenheizung umgestiegen. Das Trinkwarmwasser wurde wohnungsweise über Gasdurchlauferhitzer im Badezimmer erzeugt.

3.2 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen

Im Jahr 2008 wurde mit der Erstellung der Konzepte für die energetische Modernisierung der drei Gebäuderiegel begonnen. In den Folgejahren, 2009 bis 2010, wurden die entsprechenden Konzepte umgesetzt. Hauptfokus bei der Ausgestaltung der Modernisierungsmaßnahmen lag auf einer großen Varianz der Maßnahmen sowohl im anlagentechnischen als

auch baukonstruktiven Bereich. Letztendlich konnten sieben unterschiedliche Modernisierungen umgesetzt werden. Eine durchgängige Variante für Riegel 1 und jeweils eine Variante pro Eingang von Riegel 2 und 3.

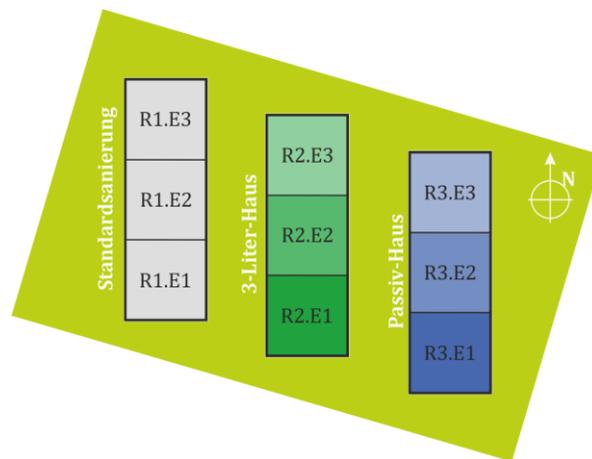


Abb. 3-4: Positionierung und Lage der betrachteten Gebäuderiegel

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Gebäuderiegel im Folgenden mit „R“, die einzelnen Eingänge mit „E“ und die Wohnungen mit „W“ bezeichnet. Die Sanierung von R1 wird als Standardsanierung bezeichnet. Der zweite Riegel (R2) wird als sogenanntes „Drei-Liter-Haus“ geplant. Dieses Gebäude soll nach erfolgter energetischer Sanierung einen Primärenergiebedarf von drei Litern Heizöl pro m^2 aufweisen. R3 wird als „Passiv-Haus“ saniert. Hier kommen innovative Komponenten sowohl im baukonstruktiven als auch anlagentechnischen Bereich zum Einsatz. Der berechnete Primärenergiebedarf soll noch unter dem Wert von R2 liegen.



Abb. 3-5: Westfassade vor (links) und nach (rechts) der energetischen Modernisierung

Zur besseren Übersicht sind die eingangsspezifischen Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Baukonstruktion und Anlagentechnik in *Tab. 3-2* gegenübergestellt. Die detaillierten Beschreibungen zu den einzeln durchgeführten energieeffizienten Modernisierungsmaßnahmen sind in den folgenden Kapitel (3.2.1 bis 3.2.3) zu finden.

Tab. 3-2: Gegenüberstellung der sechs durchgeführten Sanierungsvarianten von R2 und R3

		Riegel 2 Eingang 1	Riegel 2 Eingang 2	Riegel 2 Eingang 3
Baukonstruktion	Fassade	WDVS mit 16 cm WLG 022 → U = 0,11 W/(m ² K)	WDVS mit 16 cm WLG 022 → U = 0,11 W/(m ² K)	WDVS mit 16 cm WLG 022 → U = 0,11 W/(m ² K)
	Fenster	Kunststofffenster, Tageslichtlenkung → U = 1,30 W/(m ² K)	Passivhausfenster, Tageslichtlenkung → U = 0,80 W/(m ² K)	Kunststofffenster, Tageslichtlenkung → U = 1,30 W/(m ² K)
	Dach	Verbundelement 16 cm WLG 024 → U = 0,14 W/(m ² K)	Verbundelement 16 cm WLG 024 → U = 0,14 W/(m ² K)	Verbundelement 16 cm WLG 024 → U = 0,14 W/(m ² K)
	Keller	Verbundelement 8 cm WLG 024 → U = 0,24 W/(m ² K)	Verbundelement 8 cm WLG 024 → U = 0,24 W/(m ² K)	Verbundelement 8 cm WLG 024 → U = 0,24 W/(m ² K)
Anlagentechnik	Heizung	Fernwärme, dez. Heizungspumpen, Kompaktheizkörper	Fernwärme, dez. Heizungspumpen, 2 Varianten Kompaktheizkörper	Fernwärme, dez. Heizungspumpen, Fußbodenheizung, Solarthermie
	Trinkwarmwasser	dez. TWW-Frischwasserstation	zentr. TWW-Erwärmung mit Heizungspufferspeicher	zentr. TWW-Erwärmung mit Heizungspufferspeicher
	Lüftung	zentr. Abluftgerät, dez. Lüftungsgeräte (raumweise) mit WRG	zentr. Abluftgerät, Zuluftelemente im Fensterrahmen	zentr. Abluftgerät, Zuluftelemente im Fensterrahmen
		Riegel 3 Eingang 1	Riegel 3 Eingang 2	Riegel 3 Eingang 3
Baukonstruktion	Fassade	Vakuumverbundplatten 8 cm WLG 008 → U = 0,11 W/(m ² K)	Vakuumverbundplatten 8 cm WLG 008 → U = 0,11 W/(m ² K)	Vakuumverbundplatten 8 cm WLG 008 → U = 0,11 W/(m ² K)
	Fenster	Passivhausfenster, Raffstore → U = 0,80 W/(m ² K)	Passivhausfenster, Raffstore → U = 0,80 W/(m ² K)	Kunststofffenster, Raffstore → U = 1,30 W/(m ² K)
	Dach	Verbundelement 16 cm WLG 024 → U = 0,14 W/(m ² K)	Verbundelement 16 cm WLG 024 → U = 0,14 W/(m ² K)	Verbundelement 16 cm WLG 024 → U = 0,14 W/(m ² K)
	Keller	Verbundelement 8 cm WLG 024 → U = 0,24 W/(m ² K)	Verbundelement 8 cm WLG 024 → U = 0,24 W/(m ² K)	Verbundelement 8 cm WLG 024 → U = 0,24 W/(m ² K)
Anlagentechnik	Heizung	Wärmepumpe mit CO ₂ -Sonden, Fußbodenheizung	2 Wärmepumpen mit CO ₂ -Sonden, Lüftungsgeräte pro Wohnung WRG	Wärmepumpe Luft + Abluft, Deckenheizung
	Trinkwarmwasser	dez. TWW-Wohnungsfrischwasserstation	dez. TWW-Wohnungsfrischwasserstation	dez. TWW-Wohnungsfrischwasserstation
	Lüftung	dez. Lüftungsgeräte mit WRG (pro Wohneinheit)	zentr. Lüftungsgeräte mit WRG je Wohneinheit	zentr. Abluftanlage, Zuluftelemente im Fensterrahmen

3.2.1 Sanierungsvarianten von Riegel R1

Die Eingänge E1 bis E3 des Gebäuderiegels R1 werden 2008 „konventionell“ mit der Standardsanierung der VOLKSWOHNUNG saniert. Standard umfasst hier den energetischen Standard, der bei der Durchführung von Sanierungen im Wohnungsbau bei der VOLKSWOHNUNG seit einigen Jahren üblich ist. Der Gebäuderiegel wird nach Abschluss der Sanierungsarbeiten im Spätherbst 2008 an das neu errichtete Nahwärmenetz angeschlossen.

Die baukonstruktive Sanierung wird für alle drei Eingänge E1 bis E3 identisch ausgeführt. Die Außenwand erhält im Zuge der energetischen Ertüchtigung eine 14 cm dicke Dämmschicht der Wärmeleitfähigkeit WLG 035 als Wärmedämmverbundsystem; rechnerisch ergibt sich somit ein U-Wert von 0,2 W/(m²K) für die Konstruktion. Die Fenster wurden komplett ausgetauscht und durch Wärmeschutzfenster (Kunststoffrahmen) mit einem U_w von 1,3 W/(m²K) ersetzt. Hierbei ist der U_w -Wert als Durchschnittswert über die drei vorhandenen Fensterformate zu verstehen.

Das Dachgeschoss der Gebäude ist nicht ausgebaut, daher wird die oberste Geschossdecke gedämmt. Auf die bestehende Konstruktion wird eine Dämmschicht aus 16 cm begehbare Wärmedämmung (WLG 035) zuzüglich eines Plattenbelages aufgebracht. Nach der Sanierung ergibt sich ein rechnerischer U-Wert von $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Wie in Bestandsgebäuden häufig anzutreffen, verfügt das Kellergeschoss über eine geringe lichte Raumhöhe; daher ist hier die Anbringung einer dicken Dämmschicht nicht möglich. Es wird daher auf ein 7 cm starkes mit Holzwerkstoff kaschiertes Verbundelement (WLG 035) zurückgegriffen. Für die Kellerdecke gegen unbeheizt ergibt sich ein rechnerischer U-Wert von $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. In Tab. 3-3 sind die U-Werte des Riegels 1 vor und nach der Sanierung gegenübergestellt.

Tab. 3-3: Gegenüberstellung der U-Werte von Riegel 1 vor und nach der Sanierung

Bauteil	U-Wert $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	
	vorher	nachher
Außenwand	1,1	0,2
Fenster	3,1	1,3
Oberste Geschossdecke	2,6	0,2
Kellerdecke	1,9	0,4

Die zum Beheizen des Gebäudes notwendige Heizenergie wird über das Nahwärmenetz zur Verfügung gestellt. Im Keller jedes Gebäudeeingangs befindet sich die jeweilige Fernwärmeübergabestation. Die installierte Übergabestation ist auf $80 \text{ kW}_{\text{th}}$ eingeregelt. Über die Fernwärme werden zwei Leitwerkschichtspeicher® mit jeweils 850 l gespeist (siehe Abb. 3-6). Die Wärmeübergabe in den Räumen erfolgt über Standardheizkörper mit Thermostatventil.

Das Trinkwarmwasser für die Wohnungen wird über die so genannte Frischwassertechnik erzeugt. Unter Frischwassertechnik wird hierbei das Verfahren der Trinkwarmwassererwärmung im Durchflussprinzip mit einem Plattenwärmeübertrager und Heizungswasser verstanden. Die für die Frischwassererwärmung notwendige Speicherwasserentnahme erfolgt über separate Anschlüsse des Leitwerkschichtspeichers®. Bei einer Zapfanforderung wird die Förderpumpe in Betrieb gesetzt, so dass das Speicherwasser den Plattenwärmeübertrager durchströmt. Der Wärmeübertrager gibt im Durchflussprinzip die Wärme an das kalte Trinkwasser ab. Im Trinkwarmwassernetz werden somit ca. 50 °C zur Verfügung gestellt. Parallel wird ein Zirkulationskreislauf mit 55 °C vorgehalten.

Um den notwendigen Luftwechsel sicherstellen zu können, wird in den Wohnungen ein Abluftsystem installiert. Die Zuluft für die Räume wird über feuchtegeführte Zuluftelemente in den Blendrahmen der Fenster der Aufenthaltsräume eingebracht. Die kontrollierte Abluftführung erfolgt durch Überströmöffnungen in den Türen und über entsprechende Abluftventilatoren in die Nebenräume (Küche + Bad).

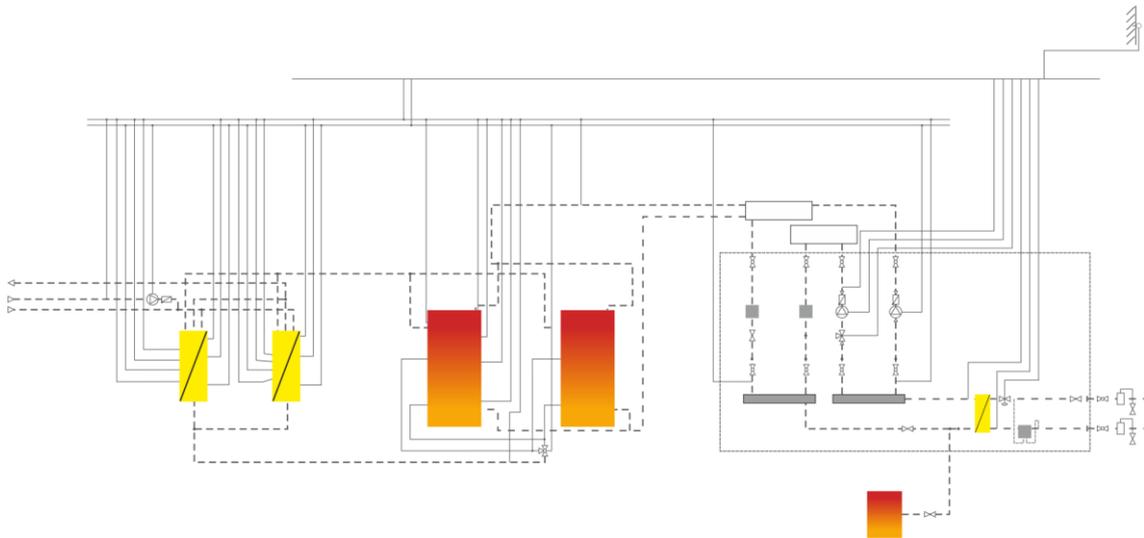


Abb. 3-6: Schema der technischen Anlagen für Riegel 1

3.2.2 Sanierungsvarianten von Riegel R2

Im Gegensatz zu Riegel R1 erhält Gebäuderiegel R2 pro Hauseingang E1 bis E3 eine differenzierte energetische Sanierung. Die Varianten wurden so ausgewählt, dass der Gebäuderiegel nach der Sanierung als so genanntes 3-Liter-Haus bezeichnet werden kann. Für die Umsetzung stehen sowohl im Bereich der Gebäudekomponenten, als auch bei der technischen Gebäudeausrüstung und Regelungstechnik eine große Anzahl technischer Innovationen zur Verfügung. Deren Einsetzbarkeit soll bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen im Wohnungsbau erprobt werden. Dabei geht es um Erfahrungen in der Praxisumsetzung, die Akzeptanz durch den Nutzer und letztendlich die energetische Wirkung jeder einzelnen Maßnahme. Die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Komponenten bietet deutlich mehr Sanierungsvarianten als Gebäude in dem Vorhaben zur Verfügung stehen bzw. realisiert werden können. Hauptfokus bei der Maßnahmenauswahl liegt darauf, die Auswirkungen der einzelnen Komponenten mit Hilfe des Messprogramms eindeutig reproduzieren zu können.

Für die ersten Überlegungen zur Umsetzung der Sanierung gilt zum damaligen Zeitpunkt die EnEV 2007. Für die Dämmung der Außenwand kommen neue Hartschaum-Elemente mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit zum Einsatz. Die λ -Werte liegen um fast 40 % unter dem guten Standard der EPS-Dämmungen ($\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$). Für RESOL-Hartschaum wird vom Hersteller eine Wärmeleitfähigkeit von $0,022 \text{ W}/(\text{mK})$ genannt. Das Material wird in einer Dicke von 16 cm auf die Außenwand aufgebracht. Rechnerisch ergibt sich ein U-Wert für die gedämmte Konstruktion von $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Im Zuge der Abrissarbeiten für die Balkone werden die Fensteröffnungen um ca. 15 cm nach oben vergrößert, um so einen größeren Tageslichtquotienten zu ermöglichen. Zur Unterstützung dieser Idee wird in den Räumen ein außenliegender Sonnenschutz installiert, welcher im oberen Drittel als Tageslichtlenkung ausgebildet ist. Das Tageslicht wird durch die Stellung der Jalousie an die Zimmerdecke umgelenkt und so als diffuses Licht in den Raum

abgegeben. Diese Ausführung wird lediglich in den beiden Schlafräumen umgesetzt, da das Wohnzimmer durch die vorgestellten Balkone keinen direkten Sonneneintrag besitzt. Der obere Teil des Sonnenschutzes kann so gesteuert werden, dass eine vollkommene Verdunklung der Räume möglich ist. Als Fenster kommen konventionelle Kunststoffrahmenfenster mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung und einem sich einstellenden U_w von $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ zum Einsatz. Der Eingang E2 des Riegels R2 variiert in der Ausführung der Fensterqualität, hier werden Passivhaus-Fenster mit $U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ eingebaut.

Die oberste Geschossdecke zum nicht ausgebauten und unbeheizten Dachgeschoss wird mit einem 16 cm starken begehbarem Verbundelement der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 024 belegt. Mit diesem Dämmelement ergibt sich für die Konstruktion ein rechnerischer U-Wert von $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Auch für die Dämmung der Kellerdecke wird auf ein Verbundelement zurückgegriffen. Aufgrund der baukonstruktiven Einschränkungen ist hier nur die Verwendung eines 8 cm dicken Elementes möglich. Rechnerisch ergibt sich ein U-Wert von $0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Tab. 3-4 sind die U-Werte von Riegel 2 vor und nach der Sanierung zu entnehmen.

Tab. 3-4: Gegenüberstellung der U-Werte von Riegel 2 vor und nach der Sanierung

Bauteil	U-Wert $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	
	vorher	nachher
Außenwand	1,1	0,1
Fenster	3,1	1,3 / 0,8
Oberste Geschossdecke	2,6	0,1
Kellerdecke	1,9	0,3

In Bestandsgebäuden dieser Altersklasse sind häufig geringe Speichermassen feststellbar. Zur Überprüfung technischer Möglichkeiten werden in den Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmern des Eingangs E3 des Riegels R2 PCM-Platten an der Zimmerdecke angebracht, um die thermische Trägheit zu erhöhen. Der Kern der Gipskartonplatten enthält Kunststoffkügelchen mit einem Speichermedium aus Paraffin. Bei Wärme- oder Kälteeinwirkung schmilzt bzw. erstarrt das Paraffin in den Speicherkapseln. D. h. bei steigender Temperatur nimmt das Paraffin durch den Phasenwechsel Wärme auf, bei fallender Temperatur wird die Wärme wieder abgegeben. Es handelt sich um einen reversiblen Vorgang im Schmelzbereich zwischen 23 und 26 °C.

Im Bereich der Anlagentechnik wird jeder Hauseingang E1 bis E3 des Riegels R2 unterschiedlich energetisch ertüchtigt. Was jedoch allen Sanierungen gemeinsam ist, ist die Verwendung der Nahwärme.

3.2.2.1 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 1

Im Eingang E1 des Riegels R2 wird durch die Nahwärme ein 750 l Leitwerkschichtspeicher® gespeist. Von hier erfolgt die Verteilung des Heizwarmwassers zu den Kompaktheizkörpern in den einzelnen Räumen der jeweiligen Wohnungen. Die Heizkörper verfügen

nicht wie üblich über Standardthermostatventile, sondern über dezentrale Heizungspumpen. Dieses System soll eine bedarfsgerechte, individuelle Wärmeversorgung der einzelnen Räume bei 20 %-iger Heizenergieeinsparung ermöglichen. Jeder Heizkörper wird mittels der Miniaturpumpe mit der benötigten Heizwassermenge versorgt (siehe *Abb. 3-7*).

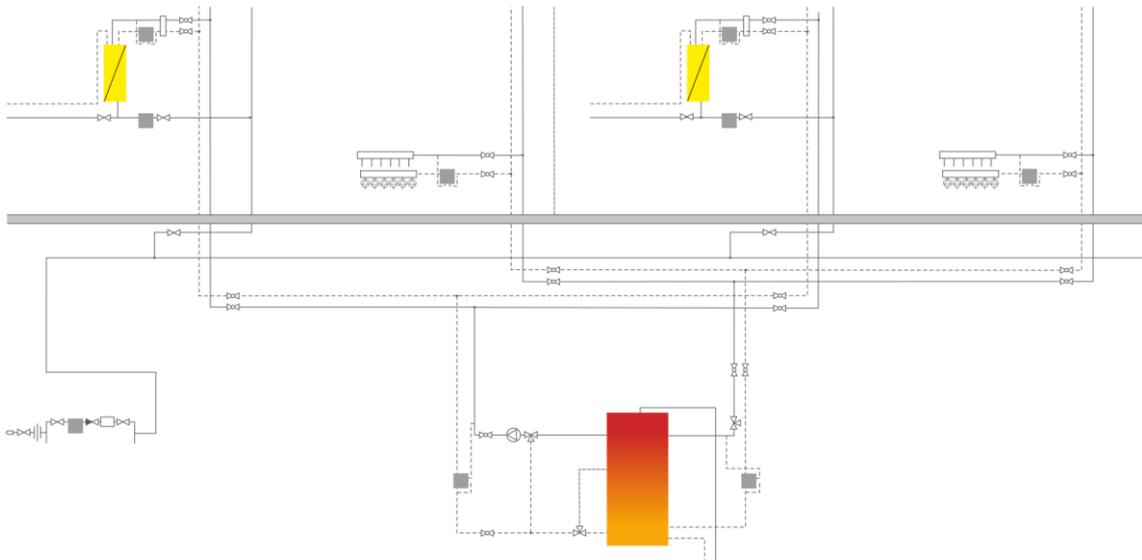


Abb. 3-7: Schema der technischen Anlagen für Riegel 2 Eingang 1

Das Trinkwarmwasser wird dezentral in den einzelnen Wohnungen erzeugt. Sobald ein Zapfprozess eingeleitet wird, wird das Wasser (50 °C) aus dem Speicher über eine leistungsgeregelte Ladepumpe in der Menge, die den Heizbedarf zur Trinkwarmwasserbereitung deckt, durch den Edelstahl-Plattenwärmeübertrager im Badezimmer gepumpt.

Die Aufenthaltsräume der Wohnungen werden über dezentrale Lüftungsgeräte be- und entlüftet. Die Geräte werden im Sturzbereich oberhalb der Fenster eingebaut. Das Gerät verfügt über einen F7-Filter und ist somit besonders für Allergiker geeignet. Der Nutzer hat die Möglichkeit zwischen zwei verschiedenen Betriebsarten zu wählen. Hierbei wird zwischen einer Variante mit „geringem stündlichen Luftwechsel“ ($\eta = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ und $\eta_{\text{WRG}} = 60 \%$) und einer Variante mit „hohem stündlichen Luftwechsel“ ($\eta = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ und $\eta_{\text{WRG}} = 40 \%$) unterschieden. In den Nebenräumen werden feuchtegeführte Fensterlüfter mit Abluftventilatoren vorgesehen.

3.2.2.2 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 2

Die anlagentechnische Sanierung für den Eingang E2 des Riegels R2 unterscheidet sich in kleinen Details von der Sanierung des Eingangs E1. Das Heizungswarmwasser wird ebenfalls über Nahwärme erzeugt. Die Beheizung der Räume erfolgt über Kompaktheizkörper mit dezentralen Heizungspumpen. Allerdings werden hier zwei unterschiedliche Heizkörper-Fabrikate (jeweils für fünf Wohneinheiten) eingebaut. Zum einen das Flachheizelement „Excellent“ der Fa. Brötje und zum anderen das Modell X2-Therm der Fa. Kermi.

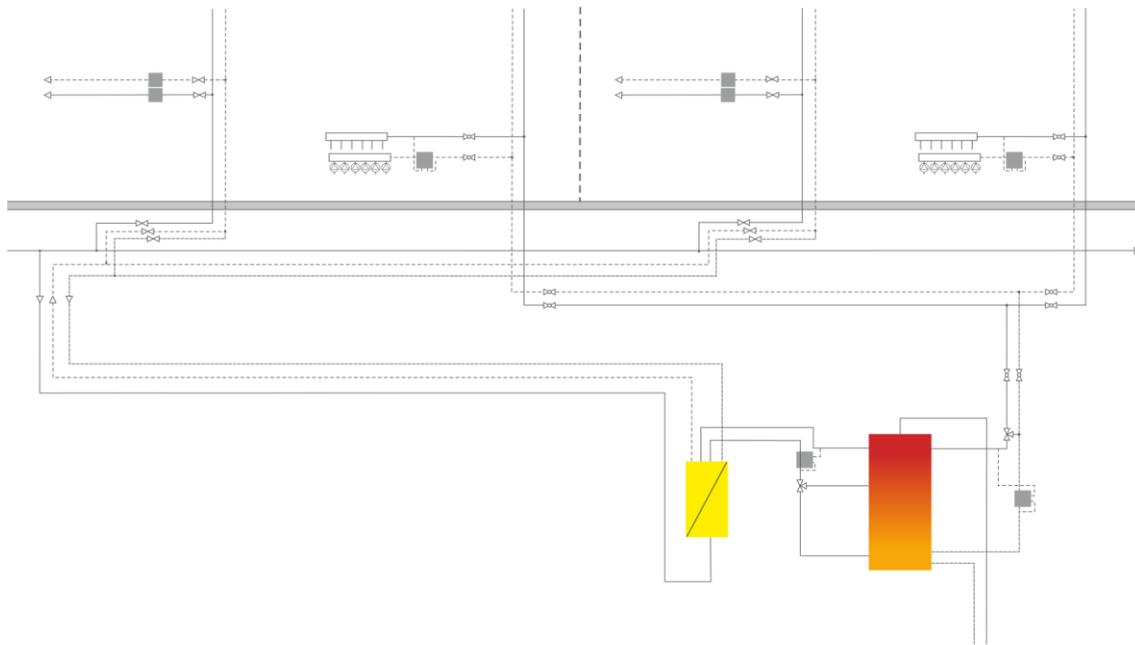


Abb. 3-8: Schema der technischen Anlagen für Riegel 2 Eingang 2

Das Trinkwarmwasser wird zentral im Keller erzeugt. Zur Verwendung kommt das Frischwassermodul FWE 40. Die Fernwärme lädt einen Leitwerkschichtenspeicher® mit 850 l. Von hier durchläuft das warme Wasser (65 °C) einen Plattenwärmeübertrager und erwärmt somit das kalte Trinkwasser. Zur schnellen Bereitstellung des Trinkwarmwassers wird parallel eine Zirkulationsleitung mit 55 °C installiert (siehe Abb. 3-8).

Zur Sicherstellung des notwendigen Luftwechsels kommen feuchtegeführte Fensterlüfter in allen Räumen der Fa. Aereco zum Einsatz. Die Abluft wird wohnungsweise zentral über das Badezimmer und die Küche abgesaugt.

3.2.2.3 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 2 Eingang 3

Auch Eingang E3 des Riegels R2 wird über die Nahwärme mit Heizwasser versorgt. Die Nahwärme versorgt einen 750 l Leitwerkschichtenspeicher®. Von hier wird die Fußbodenheizung in den einzelnen Räumen gespeist. Zum Einsatz kommt der Klimaboden Top 2000 der Fa. Joco, der speziell durch seine geringe Aufbauhöhe für den Einbau im Bestand bzw. bei der Sanierung geeignet ist. In vier von zehn Wohnungen werden zur Quantifizierung des Einsparpotentials dezentrale Heizpumpen der Fa. Wilo eingebaut.

Auf dem Dach des Gebäudes befindet sich eine 27 qm große Röhrenkollektorfläche. Das warme Wasser wird in einem Speicher im Keller gespeichert. Falls der Speicher die gewünschte Temperatur vorhält, wird der Leitwerkschichtenspeicher® versorgt. Zur höheren Effizienz wird der Röhrenkollektor mit aus dem Speicher entnommenem Wasser gespeist (siehe Abb. 3-9). Das Trinkwarmwasser wird zentral im Keller durch das gleiche Prinzip wie im Eingang E2 erzeugt.

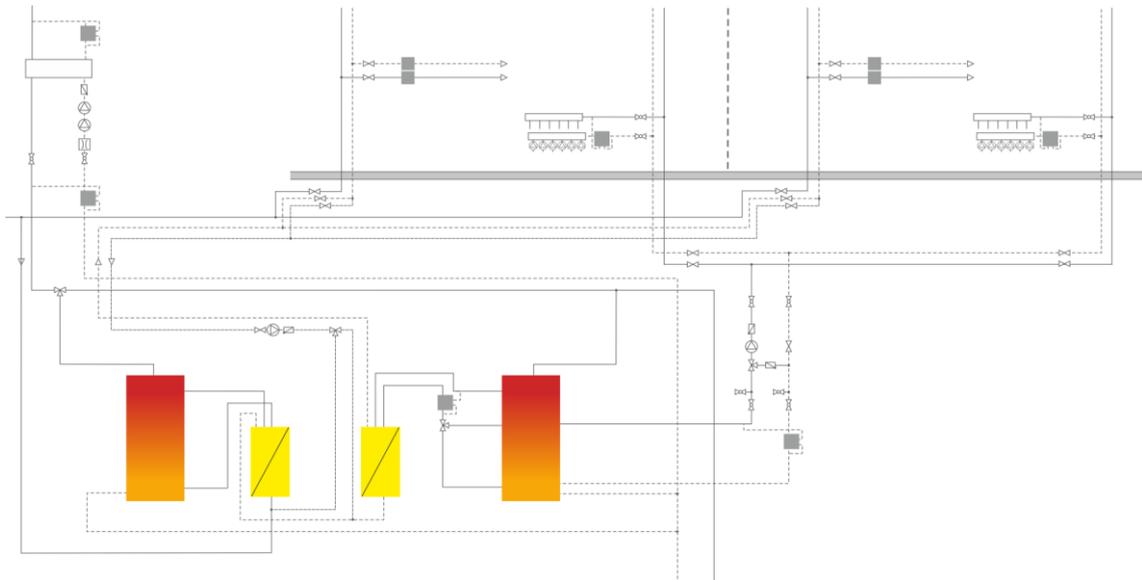


Abb. 3-9: Schema der technischen Anlagen für Riegel 2 Eingang 3

Für die Belüftung werden Rahmenlüfter der Fa. Regel Air eingebaut. Die Abluft wird ebenfalls über die Nebenräume Bad und Küche abgesaugt.

3.2.3 Sanierungsvarianten von Riegel R3

Die Außenwand des Riegels R3 wird mit Vakuumverbunddämmplatten versehen. Diese Konstruktion ist notwendig, da die bestehende Wand starke Unebenheiten aufweist, die durch eine Vakuumplatte nicht kompensiert werden können. Die Verbunddämmplatte weist eine Dicke von insgesamt 8 cm auf, wobei die eigentliche Vakuumschicht lediglich 4 cm stark ist. Das Element weist laut Herstellerangaben eine effektive Wärmeleitfähigkeit von $0,11 \text{ W}/(\text{mK})$, bezogen auf die Gesamtdicke, auf. Dies führt zu einem rechnerischen U-Wert von $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für die sanierte Außenwand.

Die oberste Geschoss- und Kellerdecke werden wie bei der Sanierung des Riegels R2 ausgeführt. Die Dämmqualität der Fenster unterscheidet sich zwischen der Passivhausqualität ($U_w = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) für die Eingänge E1 und E2 sowie den Standard-Kunststofffenstern ($U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) für den Eingang E3. Die Räume erhalten einen außenliegenden Sonnenschutz, in diesem Fall allerdings ohne Tageslichtlenkung. Aus Tab. 3-5 kann die Gegenüberstellung der U-Werte vor und nach der Sanierung für Riegel 3 entnommen werden.

Tab. 3-5: Gegenüberstellung der U-Werte vor und nach der Sanierung für Riegel 3

Bauteil	U-Wert $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	
	vorher	nachher
Außenwand	1,1	0,1
Fenster	3,1	1,3 / 0,8
Oberste Geschossdecke	2,6	0,1
Kellerdecke	1,9	0,3

Der Riegel R3 wird nicht an das Nahwärmenetz angeschlossen, vielmehr erfolgt die Wärmebereitstellung pro Eingang über unterschiedliche Wärmepumpensysteme.

3.2.3.1 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 1

Das Heizungswarmwasser wird über eine vollmodulierende Erdreich-Wärmepumpe erzeugt. Aufgrund des vor Ort vorhandenen Wasserschutzgebietes mussten Erdsonden mit CO_2 verwendet werden. Im Inneren der Sonde zirkuliert das CO_2 als Wärmeträger. Das CO_2 weist in der Sonde einen hohen Druck auf und hat somit eine große Dichte und sehr gute Wärmeübergangszahlen. Das flüssige CO_2 sinkt nach unten und nimmt dabei die Wärme aus dem Erdreich auf. Durch die Wärmeaufnahme verdampft das CO_2 , steigt nach oben und gibt dort die Energie an den Wärmeübertrager ab. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften zirkuliert das CO_2 selbstständig, es werden daher keine Umwälzpumpen benötigt. Die Wärmepumpe hat eine Leistung von $6,33 \text{ kW}_{\text{el}}$, sowie eine rechnerische Heizleistung von $32,3 \text{ kW}_{\text{th}}$. Die Wärmepumpe speist zudem den 850 l Pufferspeicher (siehe *Abb. 3-10*). Die Wärmepumpe mit CO_2 -Sonde (R3.E1) erreicht durchschnittlich eine gemessene Jahresarbeitszahl von $\sim 3,5$.

Die Räume werden über eine Niedertemperaturfußbodenheizung (Joco Klimaboden) beheizt, im Badezimmer ist zusätzlich einen Handtuchheizkörper installiert. Für die Trinkwassererzeugung sind im Keller zwei weitere Pufferspeicher mit jeweils 850 l installiert. Diese versorgen die dezentralen Wohnungsfrischwasser-Stationen in den Wohnungen, welche mit einem Wärmeübertrager arbeiten. Somit wird eine Zapftemperatur von 45 °C erreicht. Durch diese Kombination kann die für die Arbeitszahl ausschlaggebende Kondensationstemperatur niedrig gehalten werden, ohne Probleme mit Legionellenbildung zu erzeugen.

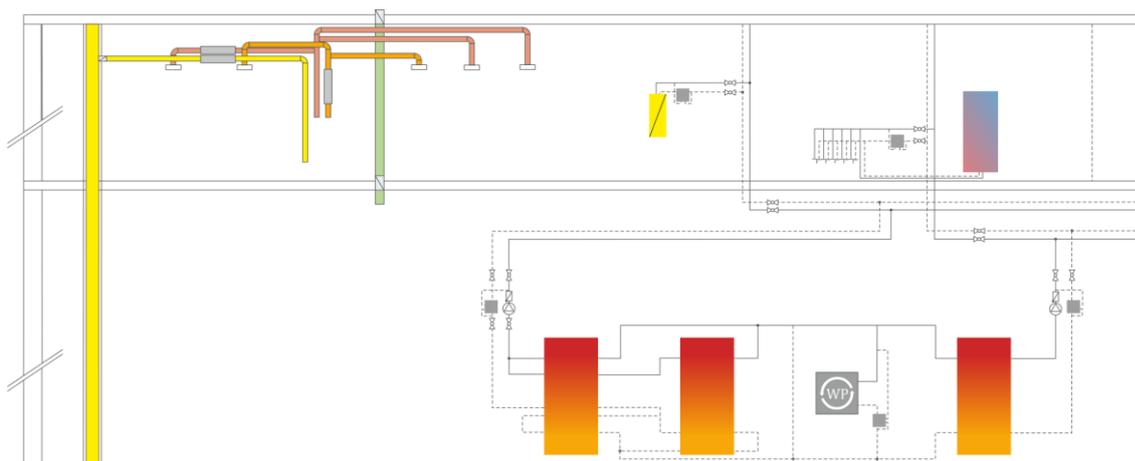


Abb. 3-10: Schema der technischen Anlagen für Riegel 3 Eingang 1

In den Wohnungen sind dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung der Fa. Schmeißer installiert, die ebenso einen Teil der Heizleistung übernehmen können. In den Nebenräumen werden $35 \text{ m}^2/\text{h}$ abgesaugt. In den Aufenthaltsräumen werden im Standard-

Modus jeweils 20 bzw. 30 m³/h zugeführt. Die hier eingebauten Geräte verfügen über einen Wärmerückgewinnungsgrad von $\eta_{WRG} = 90 \%$.

3.2.3.2 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 2

Eingang E2 wird ebenfalls durch eine Wärmepumpe mit CO₂-Sonden beheizt. Im Gegensatz zu Eingang E1 kommen hier zwei Wärmepumpen zum Einsatz. Neben einer Master-Wärmepumpe (modulierbar) ist eine weitere Slave-Wärmepumpe vorhanden, mit jeweils 2,85 kW_{el}. Die Slave-Wärmepumpe wird lediglich zur Unterstützung der Master-Wärmepumpe benutzt und zwar dann, wenn der Energieverbrauch am höchsten bzw. die Arbeitszahl der Wärmepumpe ungünstig ist (z. B. wegen TWW-Verbrauch oder Heizung an einem sehr kalten Tag). Für die Master-Wärmepumpe konnte im Betrachtungszeitraum eine höhere Jahresarbeitszahl (JAZ ~ 2,8) gemessen werden als für die Slave-Wärmepumpe (JAZ ~ 2,4). Zur Bereitstellung der notwendigen Wärme werden jeweils sechs CO₂-Sonden mit je 100 m Länge verbaut. Die Wärmepumpen beliefern sowohl einen 850 l Pufferspeicher für die Heizung als auch zwei 850 l Pufferspeicher für die Trinkwarmwasserbereitung (siehe Abb. 3-11).

Die Räume werden über eine Luftheizung beheizt, lediglich das Badezimmer erhält einen zusätzlichen Handtuchheizkörper. Die Lüftungsgeräte befinden sich als dezentrale Geräte in den Fluren der Wohnungen, von dort werden die einzelnen Räume versorgt. Die notwendige Wärme wird über den Wärmeübertrager im Gerät, welcher durch das Warmwasser des Speichers durchlaufen wird, zur Verfügung gestellt. Die Abluft wird zentral über Dach geführt und dort zurückgewonnen. Der notwendige Luftvolumenstrom zur Beheizung der Räume richtet sich nach der entsprechenden Heizlast.

Das Trinkwarmwasser wird wie in Eingang E1 über dezentrale Wohnungs-Frischwasserstationen eines anderen Herstellers erzeugt.

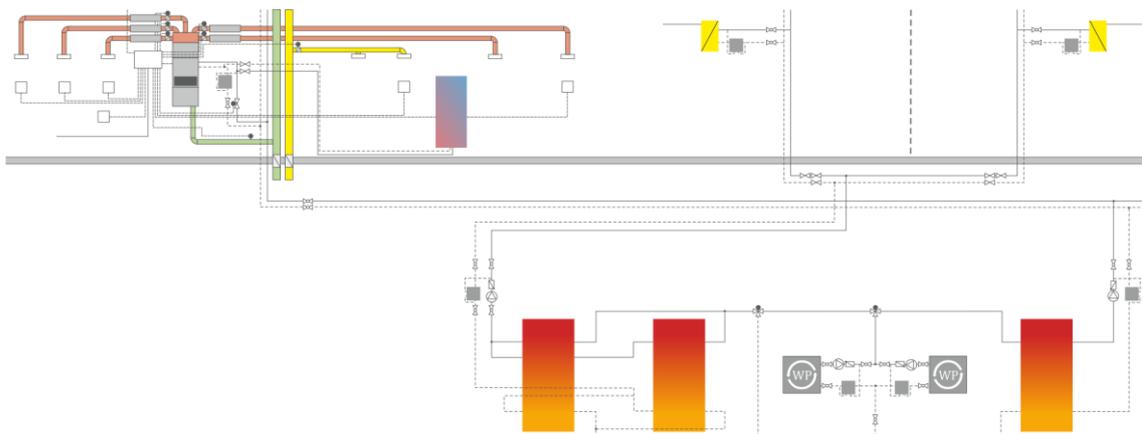


Abb. 3-11: Schema der technischen Anlagen für Riegel 3 Eingang 2

3.2.3.3 Anlagentechnische Sanierung von Riegel 3 Eingang 3

In Eingang E3 wird neben einer Außenluftwärmepumpe zusätzlich eine Abluftwärmepumpe installiert (siehe *Abb. 3-12*). Die Außenluftwärmepumpe (gemessene JAZ $\sim 3,0$) weist eine Nennleistung von $30 \text{ kW}_{\text{th}}$ und die Abluftwärmepumpe (gemessene JAZ $\sim 1,8$) von $10,5 \text{ kW}_{\text{th}}$ auf. Durch einen zentralen Wärmeübertrager wird der gesammelten Abluft die Wärme entzogen, welche zur Bereitstellung des Trinkwarmwassers genutzt wird. Im Keller befindet sich ein 850 l Pufferspeicher für das Heizwarmwasser und zwei weitere 850 l Pufferspeicher für das Trinkwarmwasser.

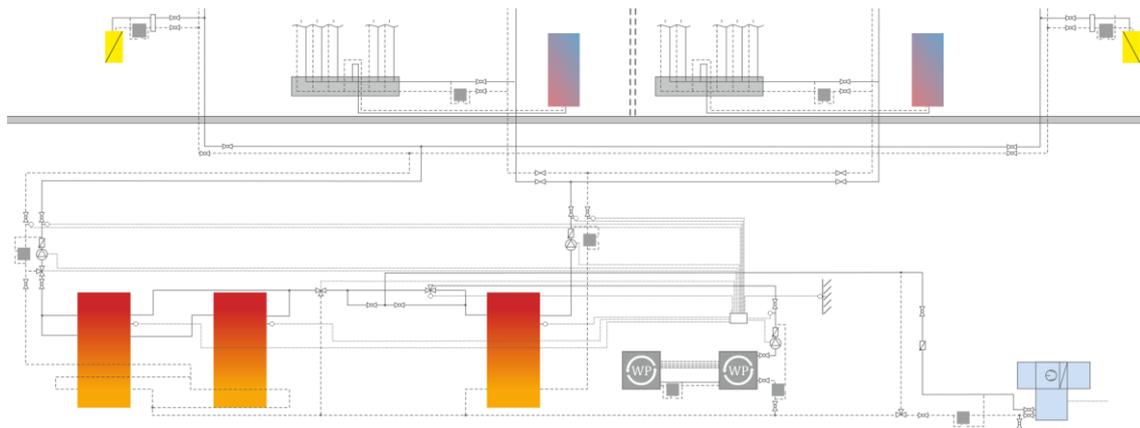


Abb. 3-12: Schema der technischen Anlagen für Riegel 3 Eingang 3

In den Räumen sind Deckenheizungen der Fa. Joco installiert; im Badezimmer zusätzlich ein Handtuchheizkörper. Die Vorlauftemperaturen der Deckenheizung belaufen sich im Heizfall auf 40 °C und im Kühlfall auf 16 °C .

Die notwendige Zuluft in den Räumen wird über entsprechende Zuluftelemente im Fensterahmen sichergestellt, während die Abluft zentral über einen Wärmeübertrager im Dachgeschoss geführt wird. Das Trinkwarmwasser wird wie in Eingang 1 und 2 dezentral als Wohnungsfrischwasserstation erzeugt; auch hier variiert das Fabrikat des Herstellers.

3.3 Bedarfsberechnungen nach EnEV und bilanzierte Energieeinsparpotentiale

Durch die Einführung der EnEV wird die Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes bewertet, d. h. Gebäudehülle und Anlagentechnik gemeinsam. Der Gesamtenergiebedarf wird zudem primärenergetisch betrachtet. Die EnEV 2014/16 enthält zwei Hauptforderungen. Zum einen wird durch das Referenzgebäudeverfahren der für das zu betrachtende Gebäude maximal zulässige Primärenergiebedarf Q_P vorgegeben. Zum anderen ergibt sich als weitere Nebenbestimmung die Einhaltung von Maximalwerten für den Transmissionswärmetransferkoeffizienten H_T , wobei der einzuhaltende Wert vom jeweiligen Gebäudetyp (freistehend, einseitig angebaut, etc.) anhängig ist.

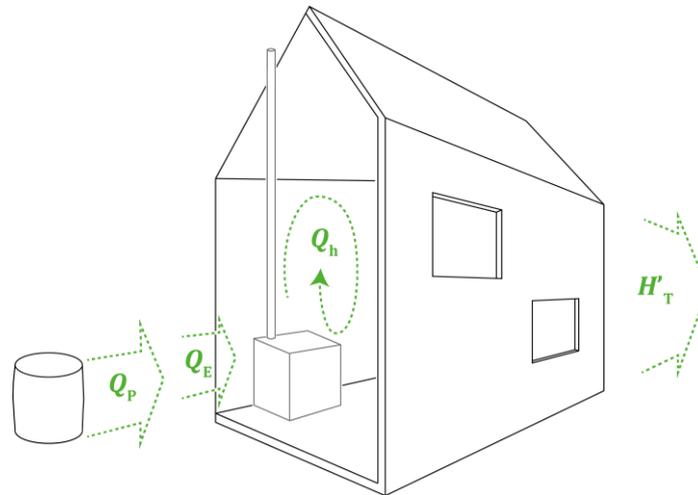


Abb. 3-13: Energiekennzahlen im Gebäude

Die Berechnung des Transmissionswärmetransferkoeffizienten kann sowohl nach DIN V 18599 als auch nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 erfolgen. Die EnEV gibt in Tabelle 2 Höchstwerte des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverlusts nach Wohngebäudetyp vor.

Die Nutzfläche der vorliegenden Gebäude ist größer als 350 m^2 . Die beiden Eingänge E1 und E3 sind jeweils einseitig angebaut, während es sich bei E2 um ein Mittelhaus handelt. Die zulässigen Werte für H'_T weichen daher geringfügig voneinander ab. Für E1 und E3 beläuft sich der maximal zulässige H'_T -Wert auf $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und für E2 auf $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Nach EnEV 2016 § 9 Abs. 1 darf dieser Wert für Bestandsgebäude um 40 % erhöht werden. Die EnEV gibt außerdem vor, dass instandgesetzte oder ausgetauschte Bauteile einen bestimmten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) nicht überschreiten dürfen. Diese Anforderungen sind in Anlage 3, Tabelle 1 der EnEV 2016 zu finden.

Geplantes Gebäude (Ist-Zustand)	Referenzgebäude (EnEV-Anforderung)
	
Gleiche Geometrie, Nutzungsfläche, Nutzung und Ausrichtung	
Bauteilqualität und Anlagentechnik nach Ausführungsplanung	Bauteilqualität und Anlagentechnik nach EnEV-Referenztablelle
Gesamt-Energieeffizienz $Q_{p \text{ ist}}$	Gesamt-Energieeffizienz $Q_{p \text{ ref}}$
\geq	

Abb. 3-14: Vergleich Ist-Gebäude und Referenzgebäude nach EnEV

Der berechnete Primärenergiebedarf für das zu sanierende Gebäude darf den Wert des Referenzgebäudes nicht überschreiten. Das Referenzgebäude ist ein rein virtuelles Gebäude, welches lediglich die gleiche Geometrie, Nettogrundfläche, Nutzung und Ausrichtung aufweist wie das zu betrachtende Gebäude. Für die Bauteilqualitäten sowie die Anlagentechnik werden die Angaben aus der EnEV für das Referenzgebäude übernommen (siehe *Abb. 3-14*).

Die sich ergebenden Ergebnisse werden mit den Ergebnissen des zu sanierenden Gebäudes gegenübergestellt. Hierbei werden sämtliche Abweichungen und Übereinstimmungen, sowohl im Bereich der Anlagentechnik, als auch der Gebäudehülle bilanziert und in Summe betrachtet. Ergibt sich für das zu sanierende Wohngebäude ein Primärenergiebedarf niedriger oder gleich dem des Referenzgebäudes, sind die Anforderungen bezüglich Q_P eingehalten und der Nachweis erbracht.

3.3.1 Excel-Tool zur Erstellung von EnEV-Berechnungen auf Basis von DIN V 4108/ DIN V 4701

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden unter Verwendung eines selbst erstellten Excel-Tools zur Berechnung gemäß Energieeinsparverordnung EnEV 2014/2016 erzeugt. Dabei erfolgt die Berechnung auf Basis der DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10. Dieses Verfahren ist weiterhin gültig und wird nach EnEV für Wohngebäude mit normalen Innentemperaturen ohne Kühltechnik verwendet. Besonderes Augenmerk wurde auf eine transparente Darstellung des Berechnungsgangs und der Variationsmöglichkeit der normativen Parameter gelegt.

Die Überprüfung der Anwendung des vorliegenden Excel-Tools erfolgte auf Grundlage eines vorgegebenen Gebäudeprofils. Sowohl die Validierung als auch die Nachweisführung nach DIN V 18599 wurden mit der kommerziellen Software „Energieberater Professional“ der Hottgenroth Software GmbH & Co. KG durchgeführt. Es konnten dabei kleinere Ergebnisabweichungen, im Bereich von max. 2 %, festgestellt werden.

Endenergie:	$q_{H,HE,E}$		kWh/(m ² a)
Primärenergie:	$q_{H,HE,P}$		kWh/(m ² a)
Endenergie:	1.	$\Sigma q_{H,WE,1,E} * A_N$	kWh/a
	2.	$\Sigma q_{H,WE,2,E} * A_N$	kWh/a
	3.	$\Sigma q_{H,WE,3,E} * A_N$	kWh/a
	$Q_{H,HE,E}$ Strom	$\Sigma q_{H,HE,E} * A_N$	kWh/a
Primärenergie:	$Q_{H,P}$	$(q_{H,WE,P} + q_{H,HE,P}) * A_N$	kWh/a
	$q_{H,P}$	$q_{H,WE,P} + q_{H,HE,P}$	kWh/(m ² a)

H_t H_v Q_s Q_t **Q_{in}** Heizgradtage I_Trinkwasserwärmung II_Lüftung III_Heizung IV_ep_Qp det_Werte

Abb. 3-15: Grafische Darstellung eines Berechnungsblattes des EnEV-Berechnungstools sowie der entsprechenden Bearbeitungsblätter (untere Leiste)

Über die "Reiter" unten im Programmfenster kann zwischen 11 verschiedenen Blättern umgeschaltet werden (siehe *Abb. 3-15*). Es erfolgt hierbei lediglich eine Verknüpfung zwischen

den einzelnen Tabellenblättern sowie Zwischenergebnissen. Die normativen Parameter können manuell basierend auf der Normung individuell eingegeben werden.

Im ersten Blatt H_T werden die Grundangaben zur Gebäudekubatur sowie die entsprechenden U-Werte inkl. F_x -Werten eingegeben. Das Blatt H_V berechnet die Lüftungswärmeverluste unter Berücksichtigung ggfs. vorhandener Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung. Unter Q_s werden die solaren Gewinne pro Fenster unter Berücksichtigung der tatsächlichen Glasfläche und in Q_i die normativen internen Gewinne berechnet. Im Reiter Heizgradtage findet eine Auflistung der Temperaturen, Strahlung etc. für den vorgegebenen Standort statt. Alle Ergebnisse fließen in das Blatt Q_H , welches den monatlich entstehenden Heizwärmebedarf ausgibt. Um den Primärenergiebedarf ermitteln zu können, schließen sich Tabellenblätter für den Trinkwarmwasser-, Lüftungs- und Heizungsbereich an. Im Reiter η -Werte können ergänzend Angaben zu Leitungslängen, spezifischen Verlusten etc. manuell ergänzt bzw. eingetragen werden.

3.3.2 Energieeinsparpotential der Gebäudehülle: spezifischer Transmissionswärmeflusskoeffizient

Nach der Aufstellung der Bauteilflächen startet der EnEV-Nachweis mit der Ermittlung des spezifischen Transmissionswärmebedarfs. Dieser Wert ist zum einen anhängig von der Güte der Bauteile (U-Werte) und deren Flächen, als auch von dem entsprechenden Temperaturkorrekturfaktor F_{xi} sowie dem Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} . Für das hier angewendete Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6 wurde für den Temperaturkorrekturfaktor auf die Pauschalwerte nach Tabelle 3 zurückgegriffen (Vornorm DIN V 4108-6). Eine genaue Bestimmung von F_{xi} -Werten für das individuelle Objekt kann nach DIN EN ISO 13789 durchgeführt werden (Norm DIN EN ISO 13789).

Für das vorliegende Gebäude wurde eine beispielhafte detaillierte Berechnung von F_{xi} auf Grundlage der Ausführungsdetails und berechneten Innenraumtemperaturen in den einzelnen Zonen durchgeführt. Als Berechnungsbeispiel sei hier die Wohnungstrennwand zum innenliegenden Treppenraum genannt. Die Normung sieht für diese Wohnungstrennwände zum niedrig beheizten Treppenraum (Innentemperaturen zwischen 12 °C und 19 °C) einen Temperaturkorrekturfaktor von 0,35 vor, die durchgeführte Berechnung ergibt lediglich einen Wert von 0,13. Durch die Verwendung des berechneten Korrekturfaktors ergeben sich geringere Transmissionswärmeverluste – im Bereich von 15 % – für diese Konstruktion.

Abb. 3-16 zeigt die Gegenüberstellung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes nach dem Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6 der Gebäude vor (rot) und nach Durchführung der unterschiedlichen Sanierungen unter Berücksichtigung der normativen Vorgaben für F_{xi} und eines pauschalen Wärmebrückenzuschlag von 0,05 W/(m²K).

Die Ergebnisse des spezifischen Transmissionswärmeverlustes spiegeln die Güte der Dämmung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche wider. Angefangen mit den Werten vor der Sanierung (rot) über die Standardsanierung mit 16 cm Dämmung der WLG 035 für R1 (grau), die Sanierung mit 16 cm Dämmung WLG 022 für R2 (grün) sowie abschließend die

Sanierung mit einer Sandwichkonstruktion aus Vakuumisolationspaneelen WLG 008 für R3 (blau).

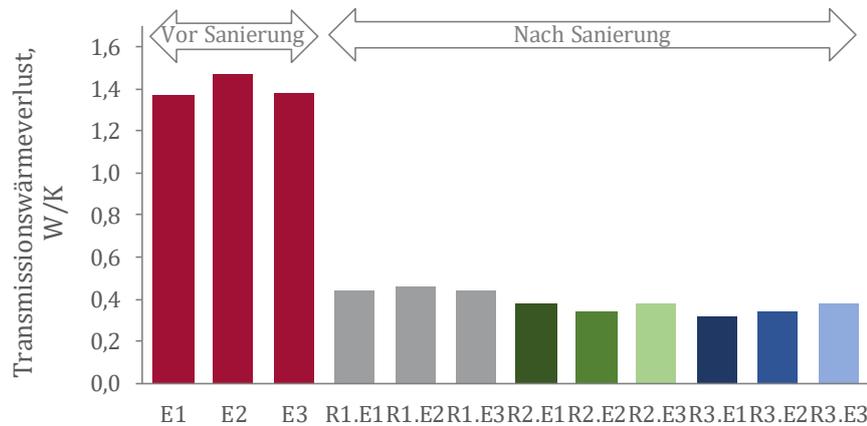


Abb. 3-16: Gegenüberstellung der spezifischen Transmissionswärmeverluste vor (rot) und nach der Sanierung für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3)

Durch die energetische Modernisierung ist eine Reduzierung der Transmissionswärmeverluste um mindestens 68 % (R1.E3) gegenüber dem ursprünglichen Zustand feststellbar. Während die Vorgaben in Bezug auf den spezifischen Transmissionswärmeverlust der EnEV 2007 zu Beginn des Projektes mit $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für ein Eckhaus bzw. $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für ein Mittelhaus noch deutlich unterschritten wurden, ist die Unterschreitung der Bedarfswerte der EnEV 2014/16 ($0,45$ bzw. $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) nicht mehr so ausgeprägt, aber weiterhin vorhanden.

Im Mittel ergibt sich für R1 eine Reduzierung der Bedarfswerte um 69 %. In R1.E2 reduziert sich der spezifische Transmissionswärmeverlust lediglich um 4,5 % bei einer Reduzierung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche (Mittelhaus) von 13 %. Daraus ergibt sich ein erhöhter Transmissionswärmeverlust gegenüber R1.E1 und R1.E3. Dieses Bild ändert sich auch nicht gegenüber dem sanierten Zustand, da jeder Eingang auf die gleiche Weise energetisch modernisiert wurde.

Für die einzelnen Eingänge von R2 zeigt sich aufgrund der unterschiedlichen Sanierungsvarianten pro Eingang ein anderes Bild als für R1. Gegenüber der Sanierungsvariante von R1 konnten im Durchschnitt weitere 17 % eingespart werden, obwohl die Fensteröffnungen im Zuge der Modernisierung im Sturzbereich vergrößert wurden. Der geringste Transmissionswärmeverlust für R2 kann mit einem Wert von $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für E2 abgelesen werden. Im Gegensatz zu den anderen Eingängen wurden hier Passivhausfenster mit einem U_w von $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ eingebaut.

Trotz Einbau einer Sandwich-Vakuumdämmung in R3 reduzieren sich die Werte für R3.E2 und E3 nicht gegenüber den Eingängen von R2, da sich die nahezu gleichen rechnerischen

U-Werte für die Bauteile ergeben. Der Unterschied für R3.E1 liegt im Einbau von Passivhausfenstern. Durchschnittlich lässt sich allerdings eine weitere Einsparung von 22 % gegenüber der Sanierungsvariante von R1 ermitteln.

3.3.3 Jahres-Heizwärmebedarf vor und nach der Sanierung

Der Jahres-Heizwärmebedarf ergibt sich aus den Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten unter Berücksichtigung der Ausnutzung der internen und solaren Wärmegewinne. Die hier dargestellten Werte wurden über das Monatsbilanzverfahren detailliert berechnet. Die Lüftungswärmeverluste ergeben sich aus der Luftwechselrate unter Berücksichtigung etwaiger Lüftungstechnik, deren Wärmerückgewinnung und dem Gebäudevolumen.

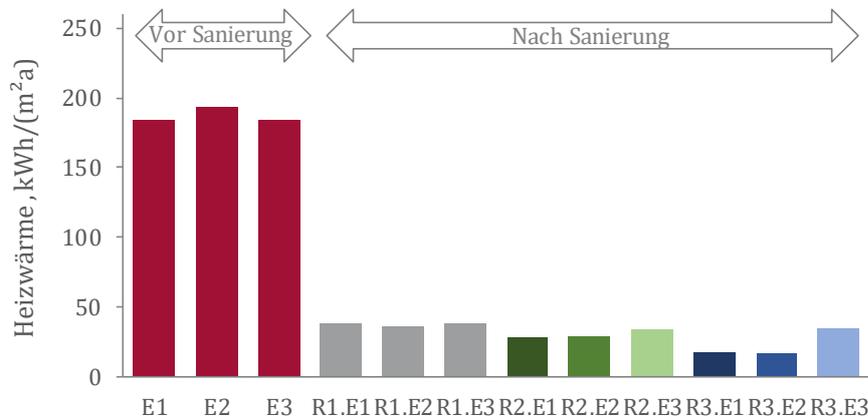


Abb. 3-17: Gegenüberstellung des Jahres-Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Nutzfläche vor (rot) und nach der Sanierung (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3)

Für die solaren Gewinne werden Angaben zur mittleren Strahlungsintensität bezogen auf die Region 12 (Standort Mannheim) angesetzt. Der Abminderungsfaktor für Fensterrahmen wird über die exakte Rahmenbreite und über die unterschiedlichen Fenstergrößen individuell bestimmt. Für die Verschattung und den Sonnenschutzgrad werden die normativen Werte nach Tabelle 9 bis 11 (Vornorm DIN V 4108-6) verwendet. Der Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster wurde den Ausschreibungsunterlagen entnommen und liegt für die Fenster mit Zweischeibenverglasung bei 0,6 und bei den Passivhausfenstern bei 0,47. Die internen Gewinne ergeben sich aus der mittleren flächenbezogenen internen Wärmeleistung und der Gebäudenutzfläche.

Abb. 3-17 zeigt die Gegenüberstellung des nach DIN V 4108-6 berechneten Heizwärmebedarfs unter Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung durch die entsprechende Lüftungstechnik (R2.E1; R3.E1; R3.E2) für die drei Gebäuderiegel vor und nach der Sanierung.

Rechnerisch lässt sich nach der energetischen Modernisierung eine Reduzierung des Jahres-Heizwärmebedarfs von bis zu 91 % (R3.E1/E2) feststellen. Während vor der Sanierung Werte im Bereich von 190 kWh/(m²a) vorlagen, können nach der Sanierung Bedarfswerte im Bereich von 13 bis 38 kWh/(m²a) abgelesen werden.

Für R1 liegen die höchsten rechnerischen Bedarfswerte vor, da hier keine Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung eingebaut wurde. Die Werte für den Jahres-Heizwärmebedarf liegen im Bereich von 37 kWh/(m²a). Die Varianz der Werte für die einzelnen Eingänge ergibt sich durch die jeweilige Lage der Gebäude und den Fensterausrichtungen.

Gegenüber R1 können durch die energetische Modernisierung in R2 im Durchschnitt weitere 5 % am Jahres-Heizwärmebedarf eingespart werden. Der geringste Jahres-Heizwärmebedarf in R2 ist für E1 aufgrund der dezentralen Lüftungsgeräte mit WRG ablesbar. Er beläuft sich auf 27 kWh/(m²a). Die beiden anderen Eingänge werden durch Rahmenlüfter im Fenster ohne WRG belüftet; daher fallen die Werte trotz Mittellage und Passivhausfenster für R2.E2 höher aus. In R2 wurde die gleiche anlagentechnische Modernisierung vorgenommen wie in R1. Der Wert für den Jahres-Heizwärmebedarf für R2.E3 weicht aufgrund der geringeren U-Werte von R1.E3 ab.

Weitere 5 % des Jahres-Heizwärmebedarfs können durch die energetische Modernisierung von R3 gegenüber R2 eingespart werden. Die maximale Einsparung bzw. der geringste Bedarfswert kann für R3.E1 mit lediglich 17,4 kWh/(m²a) ermittelt werden. Für R3.E2 ergibt sich durch die technische Ausführung der Lüftungstechnik ein etwas geringerer Wert. Für R3.E3 lässt sich aufgrund der gleichen baukonstruktiven als auch anlagentechnischen Sanierung der gleiche Wert wie für R2.E3 feststellen.

Die Werte des Heizwärmebedarfs von R2.E1, R3.E1 und R3.E2 fallen, wie in *Abb. 3-17* dargestellt, durch die Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung um 5 % (R2.E1) bzw. bis zu 50 % (R3.E1, R3.E2) geringer aus als bei einer Berechnung ohne Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung.

3.3.4 Jahres-Endenergiebedarf vor und nach der Sanierung

Als Maß für die Energieeffizienz der Sanierung eines Gebäudes inklusive der installierten Anlagentechnik wird der Endenergiebedarf angegeben. Der Endenergiebedarf gibt die Energiemenge unter Verwendung des Standardklimas und den Standardnutzungsbedingungen an, die zum Betrieb des Gebäudes mit den normierten Innenraumtemperaturen sowie des Warmwasserbedarfs und den Lüftungswärmeverlusten notwendig ist.

Abb. 3-18 stellt die Endenergiebedarfswerte vor der Sanierung (rot) den Werten nach der Sanierung mit den unterschiedlichen Sanierungsvarianten (grau, grün, blau) gegenüber. Wie bereits bei den Werten für den Jahres-Heizwärmebedarf erkennbar, ergibt sich für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten ein hohes Energieeinsparpotential.

Während für die Standardsanierung von R1 berechnete Endenergieeinsparungen von bis zu 79 % vorhanden sind, erhöhen sich diese Einsparungen für die weiteren Sanierungsvarianten von R2 und R3 auf bis zu 95 %. Derartig geringe Endenergiebedarfswerte ergeben sich, wenn regenerative Energieträger für den Betrieb des Gebäudes Verwendung finden.

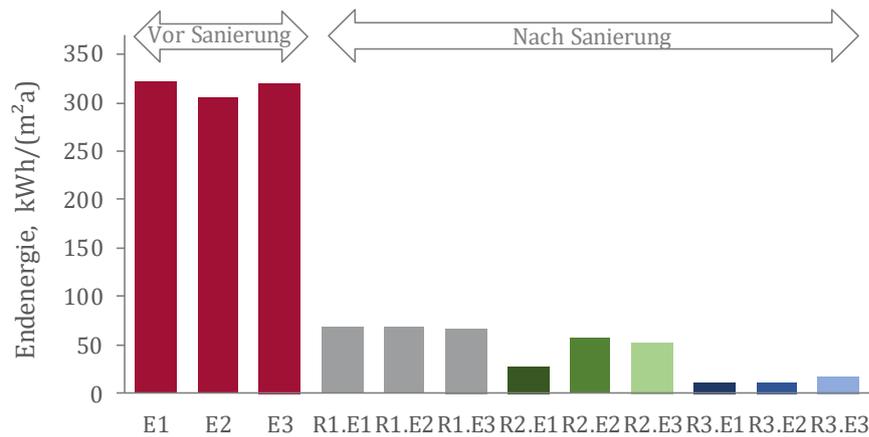


Abb. 3-18: Gegenüberstellung des Endenergiebedarfs vor (rot) und nach der Sanierung (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3)

3.3.5 Primärenergieeinsparpotential nach der energetischen Sanierung

Die Grundlage für die Ermittlung des Nutzenergiebedarfs Q_N , welcher die Energiemenge angibt, die für das Aufrechterhalten der gewünschten Temperatur notwendig ist, bilden die bauphysikalischen Daten, die Geometrie sowie die meteorologischen Randbedingungen. Die notwendige Endenergie Q_E ergibt sich unter Berücksichtigung von Q_N sowie der Summe aller Verluste innerhalb des Gebäudes für die Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Abgabe von Heizung, Warmwasser und Lüftung. Die erforderliche Primärenergie berechnet sich mittels Multiplikation eines Primärenergiefaktors f_p (von bspw. 0,7 für die Fernwärme) mit dem jeweiligen Endenergiebedarf Q_e .

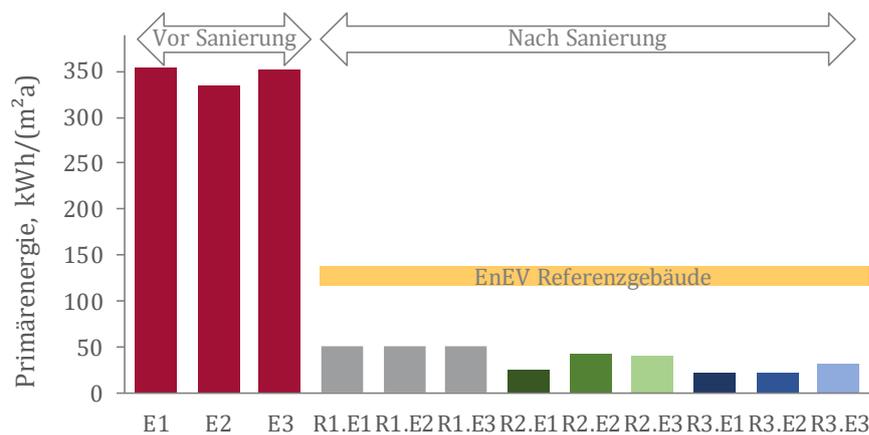


Abb. 3-19: Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs vor (rot) und nach der Sanierung (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3)

In Abb. 3-19 sind der Primärenergiebedarf Q_p vor (in rot dargestellt) und nach der Sanierung pro Eingang gegenüber gestellt. Durch die energetische Modernisierung kann eine markante Primärenergieeinsparung von mindestens 95 % erzielt werden.

Der auf die Gebäudenutzfläche bezogene Jahres-Primärenergiebedarf der jeweiligen Sanierungsvariante muss den berechneten Jahres-Primärenergiebedarf des entsprechenden Referenzgebäudes unterschreiten. Alle Sanierungsvarianten unterschreiten deutlich die Vorgaben der gültigen EnEV bzw. des Referenzgebäudes.

Vor der Sanierung lagen die Werte des Primärenergiebedarfs im Bereich von $350 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Durch die sehr umfangreichen Dämm-Maßnahmen, die Erneuerung der Anlagentechnik und den Anschluss an das Fernwärmenetz kann für R1 im Durchschnitt eine Primärenergieeinsparung von 85 % erzielt werden.

Für R2 kann eine weitere Reduzierung der Primärenergiebedarfswerte um knapp 2 % erreicht werden. Dies ist zum einen auf die bessere Dämmung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche als auch auf dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung in R2.E1 ($43,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) und die solare Trinkwarmwasserunterstützung in R2.E3 ($40,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) zurückzuführen.

Die geringsten Primärenergiebedarfswerte können für die Sanierungsvarianten von R3 erzielt werden. Durch die Verwendung von Umweltwärme durch den Einsatz von Wärmepumpen reduzieren sich die Bedarfswerte um weitere 10 % gegenüber R1. Eingang E1 ($20,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) und E2 ($21,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) weisen die geringsten Werte von R3 auf, da hier Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz kommen.

Die in *Abb. 3-19* dargestellten Primärenergiebedarfswerte basieren auf dem nach EnEV 2016 gültigen Primärenergiefaktor für Strom von 1,8. Noch bis zum 31.12.2015 belief sich dieser Wert auf 2,4. Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs nach der Sanierung bedeutet dies, dass allein durch die Verwendung des nun gültigen Primärenergiefaktors für Strom für R1 eine durchschnittliche Reduzierung um 3,4 %, für R2 eine Verbesserung um 5,3 % und für R3 mit Wärmepumpennutzung eine Einsparung um weitere 12 % erzielt wird.

3.3.6 Vergleich des spezifischen Heizwärmebedarfs nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 und DIN V 18599

Die Berechnungsverfahren der beiden Normen führen zu unterschiedlichen Ergebnissen der Bedarfswerte. *Abb. 3-20* zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den spezifischen Heizwärmebedarf in den betrachteten Eingängen von R1, R2 und R3. Der berechnete spezifische Heizwärmebedarf Q_H ist bei allen Sanierungsvarianten nach DIN V 4108-6 geringer als nach DIN V 18599. Der Abweichung liegt im Durchschnitt über alle Varianten bei ca. 25 %. Diese Differenz des Heizwärmebedarfs der beiden Normen ist im Wesentlichen auf nachstehende Faktoren zurückzuführen.

Zum einen beläuft sich die zu berücksichtigende Innenraumtemperatur nach DIN V 4108-6 auf 19 °C und im Gegensatz dazu nach DIN V 18599 auf 20 °C . Die Differenzen der Innen-

raumtemperatur Θ_i und der Außenlufttemperatur Θ_e geht als Multiplikator in die Wärmeströme Q_T und Q_V ein. Dementsprechend sind die Wärmeströme der Transmission und Lüftung nach DIN V 18599 höher.

Zum zweiten bilden unterschiedliche Werte die Grundlage für die Berechnung der spezifischen internen Gewinne. Nach DIN V 4108-6 beträgt Q_i 5 W/m^2 und nach DIN V 18599 lediglich $3,5 \text{ W/m}^2$. Dies führt zu höheren inneren Wärmeströmen nach DIN V 4108-6. Allerdings berücksichtigt die DIN V 18599 interne Wärmequellen der Anlagentechnik; dies reduziert die Abweichungen von Q_i der beiden Normen.

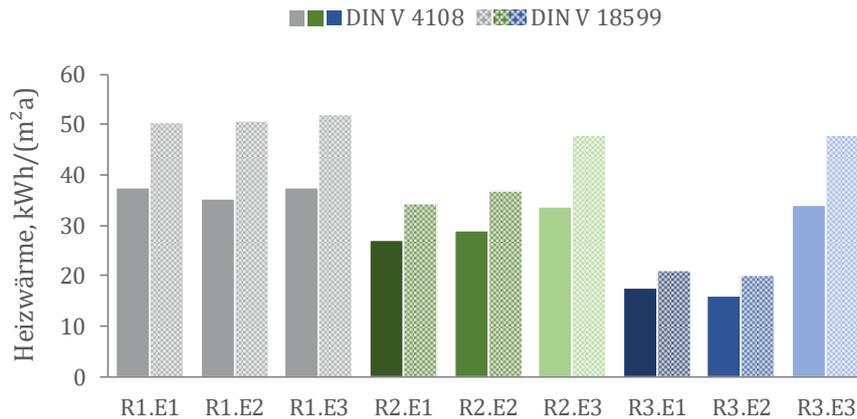


Abb. 3-20: Vergleich des spezifischen Heizwärmebedarfs für alle Sanierungsvarianten (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3) nach DIN V 4108 (Vollfarbe) und DIN V 18599 (Schraffur)

Bis zum jetzigen Zeitpunkt ist es zulässig, die Bedarfsberechnungen im Rahmen der EnEV nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 oder nach DIN V 18599 durchzuführen. Da eben diese Unterschiede in den Ergebnissen der Berechnungen auftreten, gibt es intensive Bestrebungen die Berechnungen nur noch nach DIN V 18599 zuzulassen. Hier erfolgt die Nachweisführung deutlich genauer. Zudem können die europäischen Bestrebungen besser abgedeckt werden (Tuschinski 2017).

4 Monitoring

4.1 Messtechnisches Konzept

Die im Vorfeld durchgeführten Bedarfsberechnungen und die damit einhergehenden prognostizierten Einsparungen werden häufig nach einer energetischen Sanierung nicht erzielt (Haas und Biermayr 2000). Um den Ursachen für diese Abweichung auf den Grund gehen zu können ist es notwendig, im Zuge der energetischen Modernisierung ein umfangreiches, hochauflösendes Monitoring zu installieren.

Durch ein umfangreiches Monitoring besteht die Möglichkeit, die sich einstellende Effizienz der energetischen Maßnahmen und damit einhergehend den Nutzerkomfort sowie die thermische Behaglichkeit validieren zu können. Die installierte Messtechnik ermöglicht eine Auswertung des Energieverbrauchs von der Erzeugung über die Speicherung bis hin zur Verteilung und dies sowohl für die Bereiche Heizung und Trinkwarmwasser. Die in *Abb. 4-1* dargestellte Topologie des Messsystems wurde von Prof. Wolfrum entwickelt und umgesetzt. Ergänzende Details können (Wolfrum und Bloch 2012) entnommen werden.

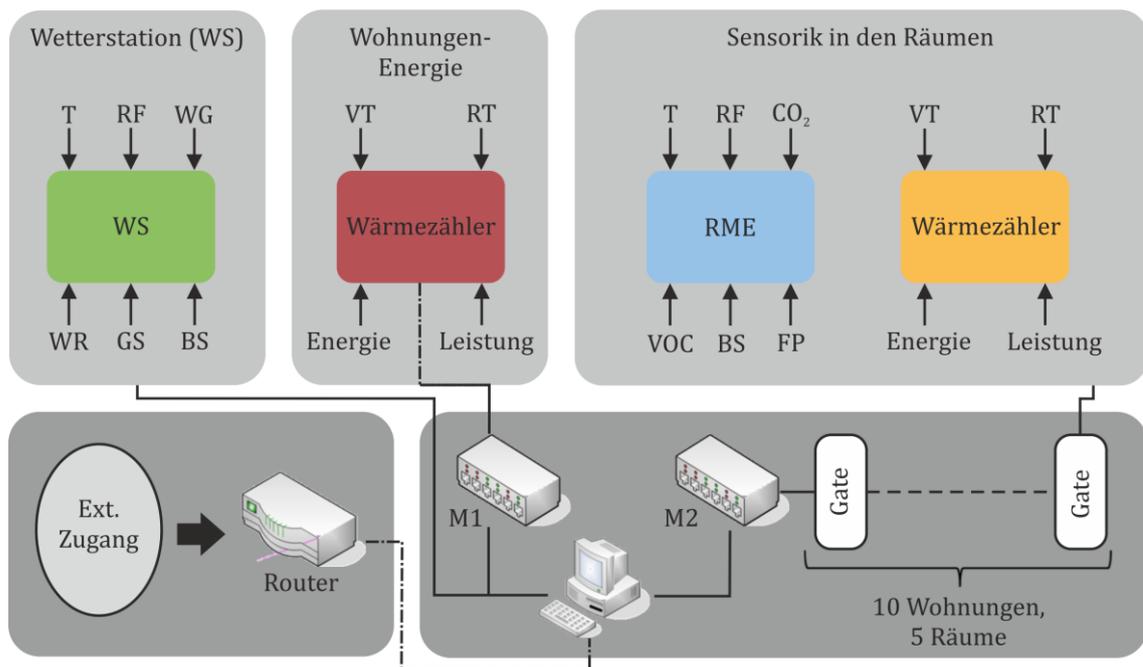


Abb. 4-1: Überblick über die Topologie des Messsystems (in Anlehnung an Cali)

Die gemessenen Daten werden über unterschiedliche Bussysteme abgefragt. Hierzu wurde während der Sanierungsmaßnahmen pro Wohnung ein Busstrang installiert, an dem die wohnungsweisen Messmodule angeschlossen wurden. Die Daten werden zyklisch abgerufen und archiviert.

4.1.1 Installierte Messtechnik im Raum

In Riegel 2 und 3 wurden zusätzlich zur zentralen Messtechnik auch raum- bzw. wohnungsweise Daten erhoben. Für Riegel 1 war dies aus Gründen des Bauablaufes nicht möglich; hier wurden batteriebetriebene Messmodule für einen kurzen Zeitraum von einem Jahr zum Basisvergleich installiert. Die Analyse der Dynamik der raumweisen Parameter wie Raumluftqualität, Luftwechsel, etc. wird über Messfühler mit einer hohen Genauigkeit und Abtastfrequenz ermöglicht.

Tab. 4-1: Übersicht der raumweise gewonnenen Messdaten aus dem „Messpils“

Messgröße	Messbereich	Messgenauigkeit	Hersteller
Raumlufttemperatur	-40 °C - +120 °C	± 0,3 K	Sensirion SHT 75
Relative Feuchte	0 % - 100 %	± 1,8 %	Sensirion SHT 75
Kohlendioxidgehalt	0 - 5.000 ppm	ca. 30 ppm bzw. 5 % des Messwertes	Senseair K30
Beleuchtungsstärke	0 - 1.000 lux		TAOS TSL2560-E58

Das Raum-Messmodul enthält Sensoren zur Messung der Raumlufttemperatur und -feuchte, einen kombinierten VOC/CO₂-Sensor, sowie zwei Sensoren für eine qualitative Tageslichtmessung. Die Details zum Messmodul können aus Tab. 4-1 entnommen werden.

Aus baukonstruktiven Gründen war eine Anbringung des raumweisen Messmoduls nicht in der Deckenmitte möglich. Wie Abb. 4-2 zu entnehmen ist, befindet sich das Modul in der Raumecke nahe der Außenwand. Das Messmodul beinhaltet sämtliche oben aufgeführte Sensoren.



Abb. 4-2: Position (rot) sowie Foto des verbauten Messmoduls in den einzelnen Räumen der Wohnungen des Riegels R2 und R3 (in grün Wilo-Messeinheit)

Alle Sensoren werden gebündelt in der Hülle eines Rauchmelders installiert (siehe Foto). Diese Sensoren entwickeln Wärme, die durch die Deckhülle nur bedingt entweichen kann. Daher wurde im Vorfeld der Installation in den Wohnungen einen Laborversuch unter den

gegebenen Nutzungsrandbedingungen durchgeführt. Letztendlich konnte durch die messtechnische Überprüfung eine Temperaturerhöhung der Innenraumtemperatur im Messmodul von 2,5 K festgestellt. Bei der Auswertung der Raumlufthtemperatur werden daher die aufgezeichneten Werte um den Faktor 2,5 K reduziert, um so näherungsweise auf die tatsächliche Temperatur im Raum schließen zu können.

Die in Riegel 2 und 3 eingebauten Fenster verfügen über Reed-Kontakte. Über diese Sensoren kann festgestellt werden, wann ein Fenster geöffnet bzw. geschlossen ist. Eine Aussage über die detaillierte Fensterposition, gekippt oder komplett geöffnet, ist unter Zuhilfenahme der eingebauten Sensoren nicht möglich.

Falls Lüftungstechnik in der Wohnung installiert wurde, wird die Zulufttemperatur direkt am Auslass gemessen. Je nach Lüftungssystem unterscheidet sich daher die Position. Für diese Messungen und zur Ermittlung des qualitativen Volumenstromes kamen Sensoren der Fa. NTC-Thermistor zum Einsatz.

4.1.2 Installierte Messtechnik im Gebäude

Neben den raumweisen Daten werden auch wohnungsweise Daten erhoben, um mögliche Verteilverluste identifizieren und Aussagen zur Effizienz treffen zu können. Neben den Wärmemengen werden die Daten zu Vor- und Rücklauftemperaturen erhoben. Detaillierte Informationen zur installierten Messtechnik außerhalb der Räume kann aus *Tab. 4-2* entnommen werden.

Tab. 4-2: Übersicht der außerhalb des Raumes gewonnenen Daten

Messgröße	Messbereich	Messgenauigkeit	Hersteller
Vor-/Rücklauftemperatur Heizkörper	50 °C - +120 °C	± 0,2 K (unter Berücksichtigung der Messkette ± 0,5 K)	NTC- Thermistor, Typ Epcos
Rohranlegefühler	5 °C - 45 °C	< ± 0,1 K	ZMD TSic 506
Volumenstromzähler	5 °C - 50 °C	± 2 %	vollelektronische Kompakt-Ultraschall-Wärmezähler

Die Daten zum Heizungsvor- und -rücklauf werden ebenso erfasst wie der Volumenstrom pro Heizkörper oder Heizstrang. Diese detaillierte Messung des Volumenstromes ist nicht bei jeder Sanierungsvariante für jede Wohneinheit vorhanden; mindestens aber für vier Wohnungen pro Eingang.

Parallel zu der im Rahmen der Forschung installierten Messtechnik erfasst die VOLKSWOHNUNG die Daten des Heizungs- sowie Trinkwarmwasserverbrauchs primär und sekundär über einen externen Provider.

Auf Gebäudeebene werden ergänzende Daten z. B. Wärmemengen am Hauptstrang des Verteilers oder Wärmemengen vor und hinter dem Wärmeübertrager der Solarthermie erhoben. Im Keller sind die zentralen Speicher für das Trinkwarmwasser als auch die Heizung vorhanden. Diesen Speichern kann auf drei Höhen Wasser entnommen werden; analog der Entnahmepositionen wurden die Temperaturfühler eingesetzt. Die Messungen dienen zur Ermittlung der Zapftemperaturen und möglicher Verteilverluste sowie der Feststellung der Vermischung im Speicher nach der Beladung. Zusätzlich zu diesen Daten werden Messungen durch die Fa. Ennovatis durchgeführt, welche dankenswerterweise dem Lehrstuhl zum Abgleich zur Verfügung gestellt wurden.

4.1.3 Installierte Messtechnik im Außenbereich

Zur Überprüfung der Effizienz der gedämmten Außenwand wurden auf allen Fassadenseiten jeweils auf drei Höhen Temperatursensoren angebracht. Wie aus *Abb. 4-3* zu entnehmen ist, sind auf der Ost- und Westfassade jeweils neun Sensoren auf dem Mauerwerk und neun weitere Sensoren in der Trennschicht zwischen Dämmung und Außenputz installiert. Die Nord- und Südgiebelseite verfügt auch jeweils über neun Sensoren auf drei Höhen. Für alle Fassaden liegt der erste Sensor auf Höhe der Kellerdecke, dann folgen eine Sensorposition auf der Ebene des 2. Obergeschosses und eine dritte Reihe kurz unterhalb der Traufe.



Abb. 4-3: Anbringungsorte der Wandsensoren am Beispiel der Ostfassade (Sensorposition grün: unter Putz / rot: unter Dämmung)

Zur besseren Einordnung der Messdaten sowie für die geplanten dynamischen Simulationen wurde eine lokale Wetterstation auf dem Dach von Riegel 2 installiert. Hier werden parallel zur Wetterstation Karlsruhe die Daten zur Außenlufttemperatur, relativen Feuchte sowie Windgeschwindigkeit, etc. aufgezeichnet. Eine detaillierte Auflistung der Messgrößen ist *Tab. 4-3* zu entnehmen. Der Messzyklus für diese Daten beträgt 60 Sekunden.

Tab. 4-3: Messgrößen der Wetterstation

Messgröße	Einheit	Messbereich
Lufttemperatur	°C	-40 °C ... +60 °C
Relative Feuchte	%	10 % ... 100 %
Helligkeit	lux	0 ... 150.000 lux
Globalstrahlung	W/m ²	0 ... 1.300 W/m ²
Windrichtung		0° ... 360°
Windgeschwindigkeit	m/s	0 ... 150 km/h

4.2 Datenmanagement und Auswertung

Auf einem lokalen Server werden ungefähr sechs Millionen Messwerte pro Tag gespeichert. Durch die Vielzahl der installierten Sensoren entsteht diese Datenmenge, die nach zugehörigem Sensor sortiert und in einer Datei als „dat“-Format in einer komplexen Ordnerstruktur gespeichert wird.

Die gesammelten Daten werden in größeren Dateien zusammengefasst, um schnell und flexibel auf einzelne Daten zugreifen zu können. Das Format dieser Dateien ist das „Hierarchical Data Format“, kurz HDF genannt. In Abhängigkeit der Daten können die Komprimierungsalgorithmen durch verschiedene Optionen der Datenspeicherung effektiv arbeiten. Die HDF5 Technology schließt Werkzeuge und Applikationen für das Management, für die Bearbeitung, Visualisierung und Analyse von Daten im HDF5 Format ein. In Anlehnung an die hierarchische Struktur mit Gruppen und Untergruppen von Dateisystemen ist die Verzeichnisstruktur einer HDF5-Datei aufgebaut.

Im Vergleich zum Betriebssystem Windows werden die Dateien in „Groups“ (Gruppen = Ordner) und „Leafs“ (Blätter = Dateien) aufgeteilt. Leafs können mehrdimensionale Arrays (Bereiche) mit verschiedenen Datentypen beinhalten. Des Weiteren ist es durch die Verwendung von Groups und Leafs möglich, die Daten mit „Attributen“ (Merkmale) zu beschreiben.

Für das Forschungsvorhaben „Auswirkungen des Reboundeffekts bei der Sanierung von Bestandsgebäuden“ wurden entsprechende HDF5-Dateien generiert, welche ausführliche Informationen zu den gemessenen Einheiten beinhalten. Ohne das gesamte Datenfile zu laden, kann direkt auf die Daten eines benötigten Leafs zugegriffen werden. Ergänzende Informationen zum Datenmanagement sowie dem HDF5-Viewer können ((Müller et al. 2016) (Cali et al. 2016b, 2016c; Cali 2016) entnommen werden.

4.2.1 Erzeugung von HDF5-Dateien

Zu besserer Übersichtlichkeit und Handhabung der Daten zur Auswertung wurde die Strukturierung der gemessenen Daten an die Geometrie der Gebäude angelehnt. Unter Verwendung eines Python-Skripts, welches hauptsächlich auf den Libraries „Numpy“ und „H5Py“

sowie einigen selbst entwickelten Libraries basiert, wurden die HDF5-Dateien generiert. Pro Monat werden alle anfallenden Messdaten in einer HDF5-Datei gespeichert.

4.2.2 HDF5-Viewer zur Analyse und Visualisierung der Messdaten

Um Daten schnell und effizient auswerten zu können, wurde auf Basis der lizenzfreien Python-Software „ViTables“ eine entsprechende Plattform entwickelt. Unterschiedliche Möglichkeiten der Visualisierung sowie verschiedene Auswertungswerkzeuge werden durch die neu entwickelte Software bereitgestellt. Ergänzend gibt es verschiedene In- und Outputschnittstellen, welche hauptsächlich auf den Libraries „NumPy“, „matplotlib“ und „Pandas“ basieren.

Die Benutzeroberfläche teilt sich in fünf Bereiche auf. Für Import- und Auswertungswerkzeuge steht ein Werkzeugkoffer zur Verfügung. Durch die Verwendung des Viewers können Daten aus MySQL-Datenbanken ebenso importiert werden wie .csv-, .dat- und matlab-Files. Eine Ansicht der Baumstruktur der HDF5-Datei durch den „Tree of Database“ gibt einen Überblick über die Bearbeitbarkeit der Daten. Leafs können in Form von Matrizen im „Workspace“ visualisiert werden. Über die Verwendung eines „Data-Editor“ wird die Möglichkeit geschaffen, die Daten mit einem der vorhandenen Werkzeuge auszuwerten. Die zur Verfügung gestellte Python-Konsole bietet zudem individuelle Auswertungsmöglichkeiten. Zur weiteren Verwendung der Daten ermöglicht der Data-Editor die Speicherung der Ergebnisse als csv-Dateien. Die Ausgabe der Ergebnisse der numerischen Auswertung erfolgt im „Logger“.

Durch die flexiblen Möglichkeiten des Viewers können selbst entwickelte Plug-Ins in der universellen Sprache Python verwendet werden. Ein eigens für die Verwendung des Viewers erstelltes Handbuch bietet detaillierte Beschreibungen zu den Auswertungs- und Nutzungsmöglichkeiten.

4.3 Kennwerte aus dem Monitoring

Aufgabe des Monitorings ist es zunächst, die Vielzahl der verfügbaren Messpunkte und deren Informationen zu verdichten und verständlich zu machen. Dabei werden die Messdaten auf eine überschaubare Anzahl ausgewählter Kenngrößen reduziert und somit die Möglichkeit eines faktenbasierten Überblicks gegeben.

4.3.1 Gegenüberstellung der Außentemperaturen und Strahlung

Die Temperaturdifferenz zwischen Innenluft und Außenluft hat Einfluss auf die entsprechenden Bedarfsberechnungen nach EnEV. Für den Nachweis nach EnEV ist das Klima für Potsdam nach DIN V 18599 anzusetzen, um eine Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Gebäuden an unterschiedlichen Standorten sicherstellen zu können. Im Zuge einer Energieberatung sollte aber immer die Klimaregion verwendet werden, die dem Objektstandort am

nächsten kommt, um so realistische Außentemperaturen für die Bedarfsberechnungen berücksichtigen zu können.

Tab. 4-4 stellt die Außentemperaturen für die Region 12 (Mannheim), Potsdam und der Wetterstation für die Jahre 2012 bis 2014 gegenüber. Die mit Inkrafttreten der neuen EnEV anzuwendende Region Potsdam weist die geringste durchschnittliche Außentemperatur auf. Die Region 12, Standort Mannheim, ist um 0,7 K wärmer. Die gemessenen Außentemperaturen weisen in allen Jahren eine erhöhte Außenlufttemperatur gegenüber den Werten von Potsdam auf. Im Jahr 2014 beträgt die Differenz zwischen den jährlichen Durchschnittstemperaturen knapp 2,6 K. Bei Berücksichtigung der Region 12 (Mannheim) ergibt sich ein homogeneres Bild. Während der Wert nach Norm im Jahr 2012 um 0,8 K überschritten wird, ergibt sich für das Jahr 2013 als Jahresmittelwert der annähernd gleiche Wert wie für die Region 12, auch wenn die jeweiligen Monatsdurchschnittswerte teilweise deutlich von den Normwerten abweichen. Das Jahr 2014 war sehr warm und überschreitet den Durchschnittswert nach Norm um knapp 2 K. Diese Gegenüberstellung der standortspezifischen Messdaten mit den Daten des Testreferenzjahres in unterschiedlichen Regionen macht deutlich, welche Abweichungen in den Berechnungsergebnissen allein durch die Wahl des Standortes zu erwarten sind.

Tab. 4-4: Gegenüberstellung der Außentemperaturen der Region 12 (Mannheim), Potsdam und Wetterstation Rintheim

	T _e Reg. 12 °C	T _e Potsdam °C	T _e Rintheim 2012 °C	T _e Rintheim 2013 °C	T _e Rintheim 2014 °C
Jan	1,2	1,0	3,2	1,6	4,6
Feb	2,5	1,9	-1,8	0,2	5,8
Mrz	5,9	4,7	8,9	2,9	9,0
Apr	9,9	9,2	10,0	10,2	13,1
Mai	14,4	14,1	16,5	12,4	14,5
Jun	17,6	16,7	18,5	18,2	18,7
Jul	19,5	19,0	19,6	22,2	20,5
Aug	18,8	18,6	21,5	20,0	18,0
Sep	15,3	14,3	15,7	15,4	16,3
Okt	10,4	9,5	9,9	11,9	13,4
Nov	5,2	4,1	6,0	5,3	7,3
Dez	2,2	0,9	3,6	3,8	3,9
Jahr	10,2	9,5	11,0	10,3	12,1

Für die Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten werden lediglich die mittleren Außentemperaturen benötigt, um diese mit den normativen Werten in Vergleich setzen zu können. Nichts desto trotz spielt die Solarstrahlung keine unerhebliche Rolle bei der Berechnung der Bedarfswerte.

Tab. 4-5: Gegenüberstellung der Horizontalstrahlung für unterschiedliche Standorte und Jahre

	G Reg. 12 kWh/m ²	G Potsdam kWh/m ²	G Rintheim ₂₀₁₂ kWh/m ²	G Rintheim ₂₀₁₃ kWh/m ²	G Rintheim ₂₀₁₄ kWh/m ²
Jan	23,1	21,6	24,3	23,3	24,8
Feb	43,6	29,6	51,0	32,8	42,5
Mrz	73,7	72,2	103,1	77,8	94,6
Apr	115,2	136,1	115,4	104,1	121,1
Mai	149,5	171,1	171,1	113,3	147,8
Jun	149,8	173,5	151,4	162,2	157,2
Jul	162,2	156,2	149,0	176,9	132,2
Aug	135,4	133,9	142,8	135,2	119,7
Sep	94,3	91,4	107,4	86,8	84,5
Okt	55,1	57,3	58,5	54,6	58,2
Nov	28,1	22,3	27,5	23,5	26,6
Dez	16,4	12,6	19,7	19,2	14,5
Jahr	1.046,4	1.077,8	1.121,2	1.009,7	1.023,7

Tab. 4-5 stellt die Horizontalstrahlung für die Region 12 (Mannheim), Potsdam und Rintheim in den Jahren 2012 bis 2014 gegenüber. Hier stellt sich ein anderes Bild als bei dem Vergleich der Außentemperaturen dar. Während für Potsdam 1.077,8 kWh/m² in der Bedarfsberechnung berücksichtigt werden, liegt der anzusetzende Wert für Mannheim mit 1.046,4 kWh/m² knapp darunter. Lediglich im Jahr 2012 werden die Werte von Potsdam überschritten. In den Jahren 2013 und 2014 ist eine geringe Unterschreitung von ca. 6 % bzw. ca. 5 % feststellbar.

4.3.2 Gegenüberstellung der Heizgradtage

Für den Wärmebedarf eines Gebäudes während der Heizperiode werden die Gradtagzahl (GTZ, G_t) als auch die Heizgradtage (HGT, G) benötigt. Diese beiden Parameter stellen den Zusammenhang zwischen Innenraum- und Außenlufttemperatur her.

Für die Ermittlung der Heizgradtage müssen die ortsabhängigen Heiz- und Gradtage definiert werden. Als Heiztage werden diejenigen Tage bezeichnet, an denen die mittlere Außentemperatur unterhalb der Heizgrenze liegt. Die Heizgrenze wiederum gibt an, ab welcher Außentemperatur die Heizungsanlage eingeschaltet wird, um die vorgegebene Innenraumtemperatur zu erreichen. Nach DIN V 4108-6 Tabelle A.2 werden unterschiedliche Heizgradtage in Abhängigkeit der Heizgrenze bereitgestellt. Für Neubauten liegt die Heizgrenze bei 12 °C, bei Passivhäusern bei 10 °C und bei Altbauten bei 15 °C.

Die Ermittlung der Gradtage ist in VDI 2067 (VDI 2067) geregelt. Die Gradtage ergeben sich als Differenz zwischen dem Mittelwert der Außentemperatur und der durchschnittlichen Raumtemperatur über alle Heiztage. Sehr ähnlich werden die Heizgradtage nach VDI 3807 Blatt 1 (VDI 3807 Blatt 1) ermittelt; es wird allerdings die tatsächliche gebäudespezifische Heizgrenze zugrunde gelegt. Es bleibt zu beachten, dass die in Nachschlagewerken und Normen angegebenen Heizgradtage immer Mittelwerte für eine jahrzehntelange Periode sind

und daher von den vor Ort gemessenen Werten abweichen können. Für konkrete Aussagen müssen daher die spezifischen Energieverbräuche mit den Heizgradtagen des betreffenden Standortes und Jahres berechnet werden.

Abb. 4-4 zeigt die Gegenüberstellung der Heizgradtage für den nach EnEV zu berücksichtigenden Standort Potsdam (dunkelviolet) sowie die Region 12 (Mannheim; violett) und die lokale Wetterstation in Rintheim (hellviolett). Mit der EnEV 2014 wurde der Referenzort für die Berechnungen von Würzburg auf Potsdam geändert. Potsdam weist eine höhere mittlere Außenlufttemperatur im Gegensatz zu Würzburg auf. Für die Berechnungsergebnisse bedeutet dies, dass der Heizwärmebedarf geringer ausfällt und der Energiebedarf für Kühlung ansteigt. Dieser Sachverhalt wird durch die Gegenüberstellung in Abb. 4-4 unterstützt.

Die Werte für Potsdam liegen über das ganze Jahr betrachtet unter den Werten für Mannheim und Rintheim. Für Potsdam ergeben sich für das Jahr 2012 2.456 Kd, für Mannheim 3.130 Kd und für Rintheim 2.958 Kd. Durch die deutliche Erhöhung der Heizgradtage, Abweichung um knapp 20 %, wird der Heizenergiebedarf in der Berechnung deutlich unterschätzt. Die Werte von Rintheim weichen in dem hier betrachteten Jahr hingegen nur um knapp 5,5 % von Mannheim ab.

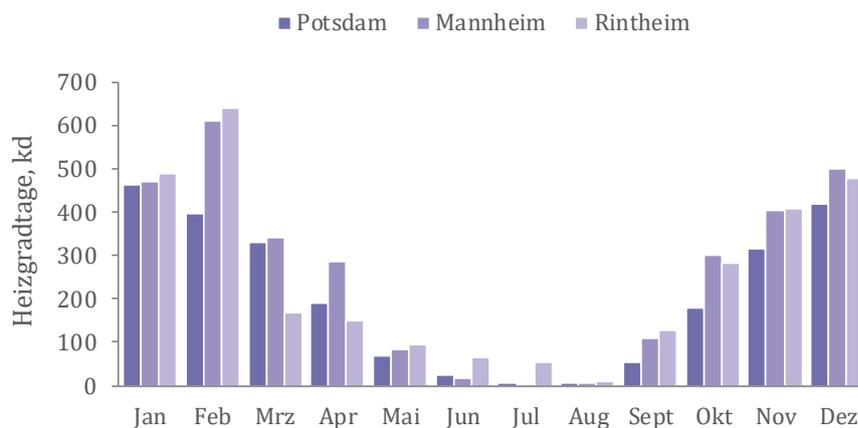


Abb. 4-4: Gegenüberstellung der Heizgradtage für Potsdam, für die Region 12 (Mannheim) und die erfassten Messwerte für Rintheim im Jahr 2012

Die DIN V 4108-6 unterscheidet für die Anwendung des Monatsbilanzverfahrens unterschiedliche Heizgrenzen und damit einhergehend verschiedene Heizgradtagzahlen. Die Heizgrenze beschreibt die mittlere Tagesaußentemperatur, unterhalb der mit dem Heizen begonnen bzw. oberhalb, der nicht mehr geheizt werden sollte. In Tabelle A.2 (Vornorm DIN V 4108-6) werden hier 19 °C, 15 °C, 12 °C und 10 °C genannt. Standardmäßig wird die Außentemperatur von 15 °C als Heizgrenze angesetzt. Die Literatur verweist allerdings darauf, dass bei sanierten Altbauten und Neubauten bei der Berechnung eher von Heizgrenze von 12 °C, wenn nicht sogar 10 °C, auszugehen ist.

Tab. 4-6: Gegenüberstellung der Korrekturfaktoren zur Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Heizgrenzen

	2012	2013	2014
Korrekturfaktor _{15_19}	1,11	0,98	1,14
Korrekturfaktor _{15_20}	1,02	0,91	1,00
Korrekturfaktor _{19_19}	1,02	0,92	1,02
Korrekturfaktor _{19_20}	0,93	0,84	0,92

Tab. 4-6 stellt die jeweiligen Korrekturfaktoren zur Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten für die Jahre 2012 bis 2014 gegenüber. Zuerst wurde eine Heizgrenze von 15 °C jeweils im Einklang mit der normativ vorgegebenen Innenraumtemperatur von 19 °C (DIN V 4108) oder 20 °C (DIN V 18599) berücksichtigt. Zur Vervollständigung werden außerdem die Werte für eine Heizgrenze von 19 °C für beiden Normen angegeben. Um die jeweiligen Verbrauchswerte der einzelnen Jahre mit einander vergleichen zu können, müssen nunmehr lediglich die Verbrauchsdaten mit dem jeweiligen Korrekturfaktor multipliziert werden (siehe 2.1.3).

Die Berechnungen für die Heizgrenze von 12 °C und 10 °C sind hier nicht angeführt, da im vorliegenden Sanierungsobjekt die Heizungsanlage im Betrachtungszeitraum ohne Abschaltung in Betrieb war. Seitens Vertretern der Mieterschaft wurden entsprechende Anforderungen an den Vermieter gestellt, auch bei höheren Außentemperaturen die Heizungsanlage zur Verfügung zu haben.

4.3.3 U-Wert-Analysen

Über die Ermittlung der jeweiligen U-Werte der wärmeübertragenden Umfassungsflächen können Aussagen zur wärmeschutztechnischen Qualität und somit zum erwarteten Energiebedarf zum Ausgleich der Transmissionswärmeverluste getroffen werden. Der U-Wert gibt dabei in $W/(m^2K)$ den Wärmestrom durch ein Bauteil an (siehe Formel 19). Die bestimmenden Größen sind hierbei die jeweilige Materialdicke, die Wärmeleitfähigkeit, etc. (siehe (Norm DIN EN ISO 6946).

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{se}} \quad (19)$$

Die Berechnungen beruhen auf der Annahme stationärer Temperaturverhältnisse, welche sich zwar im Labor einstellen, aber in der gebauten Umgebung nicht vorzufinden sind. Die tatsächlichen Randbedingungen variieren deutlich. Wie bereits in Kapitel 4.3.1 erwähnt, ergeben sich große Schwankungen der Außentemperatur. Ebenso schwanken die Temperaturen der Außenoberfläche und noch stärker schwankt die Sonneneinstrahlung im Tag- und Nachtrhythmus. Bei der Anwendung der Rechenregeln für stationäre Temperaturverhältnisse werden die zuvor beschriebenen Vorgänge, wie zeitweise Speicherung von Wärme oder entsprechende Auskühlung, nicht berücksichtigt. Allgemein ist dieses Verfahren der

stationären Betrachtung in der Fachliteratur anerkannt (Fischer et al. 2008). Die so ermittelten Ergebnisse sind ausreichend genau, denn die stattfindenden instationären Vorgänge der Wärmespeicherung und Auskühlung gleichen sich über einen längeren Zeitraum, bspw. die Heizperiode, aus (Fischer et al. 2008).

In Bezug auf den Wärmeübergang an den Innen- und Außenflächen gibt es in der Wissenschaft unterschiedliche Ansätze. Der Wärmeübergang an Innenflächen erfolgt zum einen über langwelligem Strahlungsaustausch zwischen den raumumschließenden Flächen und zum anderen über Konvektion mit der Raumluft. Im Fall von Innenoberflächen im Raum wird im Allgemeinen angenommen, dass es sich um freie Konvektion handelt (Feist 1994). Daher wird bei Innenoberflächen zwischen Konvektion an horizontalen und an vertikalen Oberflächen unterschieden. Für vertikale Flächen ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient unabhängig von der Richtung des Wärmestroms. Die Richtung des Wärmestroms beschreibt, ob die Wärmeabgabe von der Luft an die Wand oder umgekehrt verläuft. Liegt die Wandtemperatur oberhalb der Lufttemperatur wird die Luft an der Oberfläche erwärmt und steigt nach oben, andernfalls wird die Luft abgekühlt und sinkt nach unten. Die sich einstellende Strömungsform unterscheidet sich nur durch die Strömungsrichtung der Luft. In beiden Fällen stellt sich in der Regel eine turbulente Strömung ein. Als Richtwert wird ein Wärmeübergangskoeffizient von $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ empfohlen. Der Wärmeübergangswiderstand R ist wiederum definiert als der Kehrwert des Wärmeübergangskoeffizienten, er wird in $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ angegeben.

$$R = \frac{1}{h} \quad (20)$$

Der Wärmeübergang an Außenflächen setzt sich aus der Konvektion zwischen der Oberfläche und der Außenluft, dem langwelligem Strahlungsaustausch mit der Umgebung und dem Wärmeeintrag durch solare Strahlung zusammen. Für äußere Oberflächen wird die Strömungsform insbesondere durch die vorliegenden Windverhältnisse bestimmt, so dass im Allgemeinen von erzwungener Konvektion ausgegangen wird. Als Richtwert empfiehlt Glück (Glück 2008) einen Wärmeübergangskoeffizienten von $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die zweite Möglichkeit zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten orientiert sich an dem in DIN EN ISO 6946 (Norm DIN EN ISO 6946) beschriebenen Berechnungsverfahren. Hierbei wird der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an Außenflächen in Abhängigkeit der vorliegenden Windgeschwindigkeit bestimmt. Dieser Ansatz beschreibt jedoch nur den konvektiven Wärmeübergang. Um den langwelligem Strahlungsaustausch mit berücksichtigen zu können, muss dieser Wert entsprechend erweitert werden. Feist beispielsweise gibt hierfür einen konstanten Wert von $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ an (Feist 1994). Der dritte zur Verfügung stehende Ansatz nach ASHRAE (ASHRAE 2009) bezieht neben der Windgeschwindigkeit auch die Beschaffenheit der äußeren Oberfläche in die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten mit ein. Im Gegensatz zu dem in DIN EN ISO 6946 vorgeschlagenen Ansatz, umfasst der Wärmeübergangskoeffizient nach ASHRAE (ASHRAE 2009) nicht

nur den konvektiven Wärmeübergang, sondern gleichzeitig auch den Wärmeübergang durch langwellige Strahlung mit der Umgebung.

Neben den Übergangswiderständen hat die Wärmespeicherfähigkeit der Raumbooberflächen in der Energiebilanz einen Einfluss auf den monatlichen Ausnutzungsgrad, der solaren und internen Wärmegewinne sowie auf die Wirksamkeit der Nachtabsenkung. Unter der Wärmespeicherung von Bauteilen versteht man deren Eigenschaft bei Lufttemperaturzunahme infolge Wärmestrahlung entsprechend Energie aufzunehmen und sie bei Lufttemperaturabnahme wieder abzugeben. Es ist zwischen der dämpfenden und verzögernden Wirkung auf Temperaturschwankungen im Raum (Wärmespeicherung der inneren Raumumgrenzung einschließlich Raumausstattung) und der dämpfenden und verzögernden Wirkung auf den Wärmedurchgang durch Außenbauteile bei Außentemperaturschwankungen und Sonneneinstrahlung („Temperatur-Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung“) zu unterscheiden (Roggel 2000). Wird die eingestrahelte Energie bis in die Abendstunden gespeichert, muss weniger geheizt werden. Für die Menge der gespeicherten Energie ist neben der stoffspezifischen Speicherkapazität des Materials auch die Länge der Zeit, in der eine Erwärmung stattfindet, von Bedeutung. Die in einem Raum eingebrachte Wärme bleibt umso länger erhalten, je langsamer sie durch die Außenwände abgegeben wird. Dies ist wiederum von der Dämmqualität des Gebäudes abhängig (Manara 2008).

Für die Sanierung der Außenwände wurden für Riegel R2 und R3 unterschiedliche Wandaufbauten mit einem rechnerisch nahezu identischen U-Wert umgesetzt. Riegel 2 erhielt ein 16 cm starkes Wärmedämmverbundsystem mit einem λ von 0,022 W/(mK) und Riegel 3 eine 8 cm starke Sandwichkonstruktion aus Vakuumisulationspanelen mit einem λ von 0,008 W/(mK) und Standarddämmung.

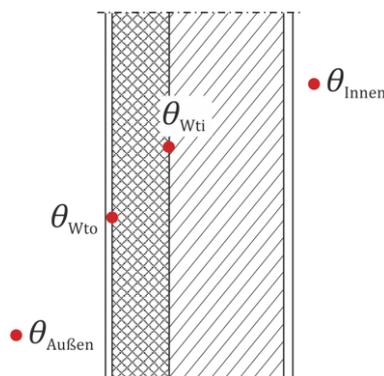


Abb. 4-5: Positionierung der Temperatursensoren unter dem Außenputz θ_{Wto} sowie in der Trennschicht zwischen Dämmung und Mauerwerk θ_{Wti}

Zur Überprüfung des sich einstellenden U-Wertes und der entsprechenden Schichttemperaturen wurden im Bauprozess Temperatursensoren in der Wandkonstruktion verbaut. Diese befinden sich auf drei unterschiedlichen Höhen und zwei unterschiedlichen Ebenen, sowohl direkt auf der Mauerwerkswand als auch unter dem Putz (ergänzende Informationen siehe Abb. 4-5 und Kapitel 4.1.3).

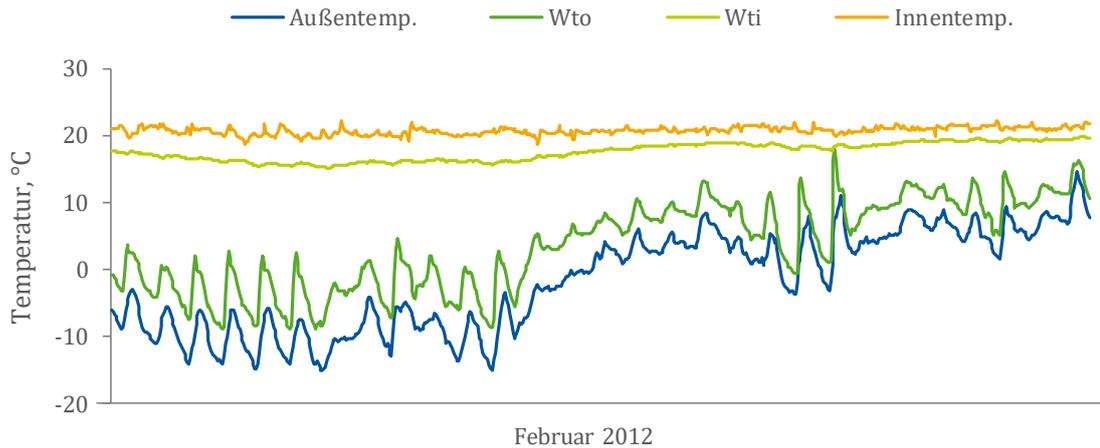


Abb. 4-6: Temperaturverlauf innerhalb der Außenwand (West) von R2.E1.W5 im Verlauf des Februar 2012

In *Abb. 4-6* und *Abb. 4-7* sind die Temperaturverläufe in der Außenwand der Westfassade auf mittlerer Position (Wohnung 5) für den kältesten Monat (Februar) in 2012 für R2.E1 sowie R3.E1 dargestellt. In Dunkelgrün ist die Oberflächentemperatur an der Schicht zwischen Außenputz und Dämmung (W_{to}) und in Hellgrün die Schichttemperatur zwischen Bestandsmauerwerk und Dämmschicht (W_{ti}) aufgetragen. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzer ergeben sich unterschiedliche Verläufe der Innenraumtemperaturen. Während sich in R3.E1 eine Durchschnittsraumtemperatur von 23,5 °C ergibt, kann im gleichen Zeitraum in R2.E1 lediglich eine Durchschnittsraumtemperatur von 20,7 °C gemessen werden.

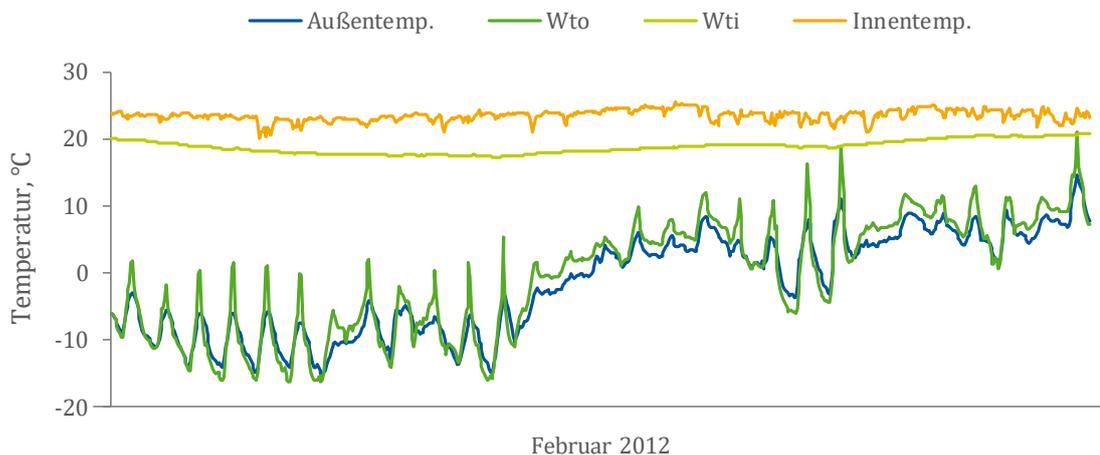


Abb. 4-7: Temperaturverlauf innerhalb der Außenwand (West) von R3.E1.W5 im Verlauf des Februar 2012

Entsprechend abweichend verhalten sich auch die Temperaturen an der Innenoberfläche der Wände. Der Verlauf der Schichttemperatur W_{to} ist nahezu identisch, allerdings um knapp 4 K verschoben. Während die Schichttemperaturen im Fall von R2.E1 grundsätzlich oberhalb der Außentemperatur verlaufen, ist im Fall von R3.E1 ein Überschwingen der Schichttemperaturen unter die Außentemperatur erkennbar. Rechnerisch sollten die

Schichttemperaturen etwa 1,5 K oberhalb der Außentemperatur verlaufen, da hier lediglich der Übergangswiderstand außen als auch der Widerstand des Außenputzes in Ansatz gebracht werden können.

Die auf Basis der Messdaten errechnete Schichttemperatur unter dem Außenputz liegt im Fall von R2.E1 über dem berechneten Wert von 2,6 °C und im Fall von R3.E1 mit 0,7 °C unter dem errechneten Wert nach Norm. In beiden Fällen liegen die gemessenen durchschnittlichen Schichttemperaturen auf dem Bestandsmauerwerk knapp unterhalb der gemessenen Werte; hier sind lediglich Abweichungen von bis zu 9 % vorhanden. Unter Berücksichtigung der angeführten Abweichungen im Bereich der Übergangswiderstände sowie der anzusetzenden Wärmespeichervorgänge stellen sich durch die Messung plausible Werte ein.

4.3.4 Wärmepumpen und deren Arbeitszahlen

Durch die Analyse der Messdaten wurde ersichtlich, dass die Wärmepumpen zu geringe Arbeitszahlen aufwiesen. Daraufhin wurden von den Herstellern unterschiedliche Reparaturen an den verschiedenen Wärmepumpen der drei Eingänge von R3 durchgeführt. Diese Ausfälle und Reparaturen hatten zur Folge, dass beispielsweise R3.E3 zeitweise nur über elektrische Heizstäbe im Warmwasserspeicher beheizt wurde. Die Regelung der Wärmepumpen in R3.E1 sowie R3.E2 wurde im Winter 2012/13 mehrfach geändert, um die Arbeitszahlen der jeweiligen Wärmepumpen zu verbessern. Im Zuge dieser Arbeiten wurde die Vorlauftemperatur für Heizung sowie Trinkwarmwasser gesenkt und die Heizkurve geändert. Negativen Einfluss auf die Arbeitszahlen der Wärmepumpen haben die dezentralen Frischwasserstationen zur Trinkwarmwassererzeugung, die Verkalkungserscheinungen aufweisen.

Abb. 4-8 bis Abb. 4-10 stellen den Anteil des Energieverbrauchs für Heizen und Trinkwarmwasser am Gesamtverbrauch für die mit Wärmepumpen beheizten Gebäude R3.E1 bis R3.E3 für das Jahr 2012 gegenüber.

Erkennbar ist, dass über 50 % des Gesamtenergieverbrauchs in R3.E1 für die Trinkwarmwasserproduktion verwendet werden. Der Wert für R3.E2 und R3.E3 liegt im Jahr 2012 etwas darunter und beläuft sich auf 46 %. Die zur Warmwasserbereitung notwendigen höheren Vorlauftemperaturen haben negativen Einfluss auf die Arbeitszahlen der Wärmepumpen.

Während in R3.E1 nur eine modulierende Wärmepumpe mit CO₂-Sonde für die Herstellung des Warmwassers sowohl für Heizen und Trinkwarmwasser installiert ist, sind in R3.E2 eine Master-Wärmepumpe (modulierend) und eine Slave-Wärmepumpe mit CO₂-Sonden verantwortlich. R3.E3 hingegen wird über eine Außenluftwärmepumpe in Kombination mit einer Abluftwärmepumpe versorgt.

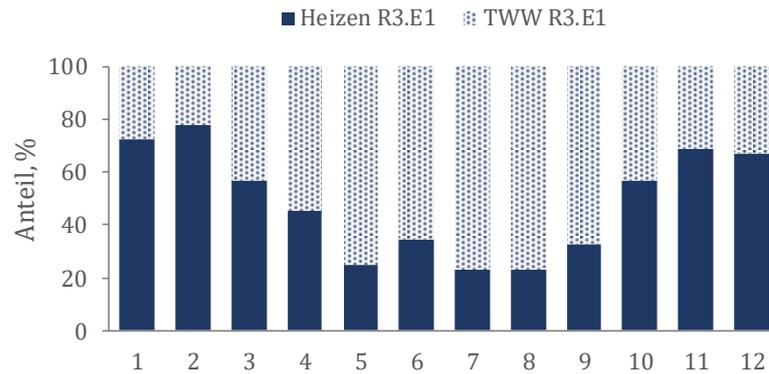


Abb. 4-8: Anteil des Heizens und Trinkwarmwassers am Gesamtverbrauch pro Monat beispielhaft aufgetragen für Eingang E1 des Riegels R3 für das Jahr 2012

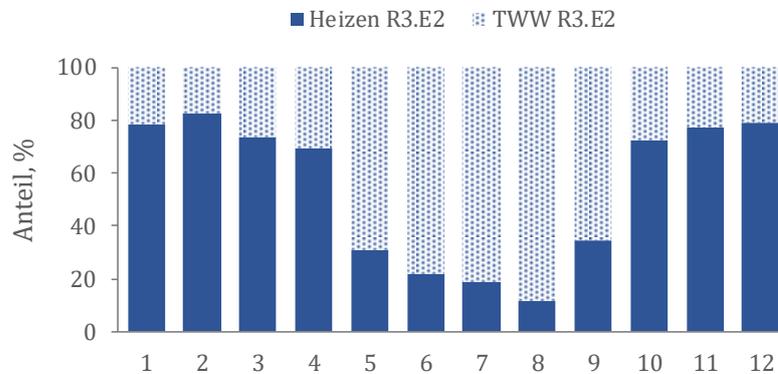


Abb. 4-9: Anteil des Heizens und Trinkwarmwassers am Gesamtverbrauch pro Monat beispielhaft aufgetragen für Eingang E2 des Riegels R3 für das Jahr 2012

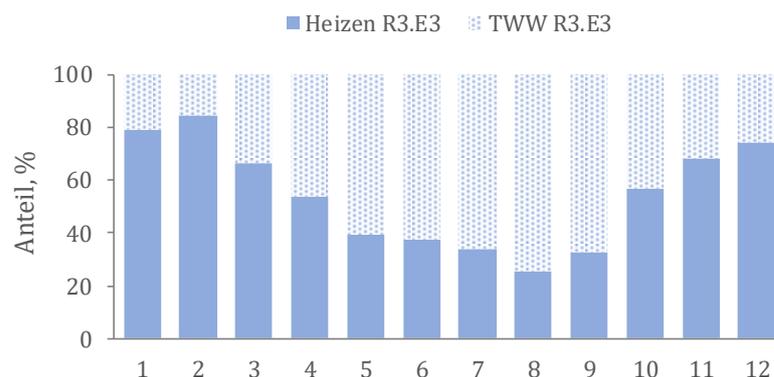


Abb. 4-10: Anteil des Heizens und Trinkwarmwassers am Gesamtverbrauch pro Monat beispielhaft aufgetragen für Eingang E3 des Riegels R3 für das Jahr 2012

Abb. 4-8 bis Abb. 4-10 zeigen außerdem, dass über das gesamte Jahr hinweg, auch in den Sommermonaten, Heizenergie konsumiert wird. Das Verhältnis von Trinkwarmwasser- und Heizenergieverbrauch verhält sich dem Jahresverlauf entsprechend. In den Wintermonaten überwiegt der Heizungsanteil, was sich in den Sommermonaten entsprechend ändert.

Allerdings sollte im Sommer kein Heizenergieverbrauch feststellbar sein. In R3.E3 ist im Vergleich zu den anderen Eingängen dieses Riegels in den Sommermonaten ein erhöhter Anteil für die Beheizung von knapp 40 % am Gesamtenergieverbrauch ablesbar.

Bei der Analyse der Anteile der jeweiligen Wärmepumpen an der Gesamtenergieerzeugung für jeweils R3.E2 und R3.E3 ergibt sich ein heterogenes Bild. Während die Slave-Wärmepumpe in den Monaten April bis Dezember bis fast 100 % der Energiemenge deckt, beläuft sich der Anteil im Januar bis März bei knapp 55 %. Dies ergibt über das Jahr 2012 betrachtet einen Anteil von 88 % an der Gesamtenergieproduktion. Die Außenluftwärmepumpe von R3.E3 stellt mit 86 % des Gesamtenergieverbrauchs den größten Anteil, allerdings verhält sich die Aufteilung über das Jahr betrachtet deutlich homogener.

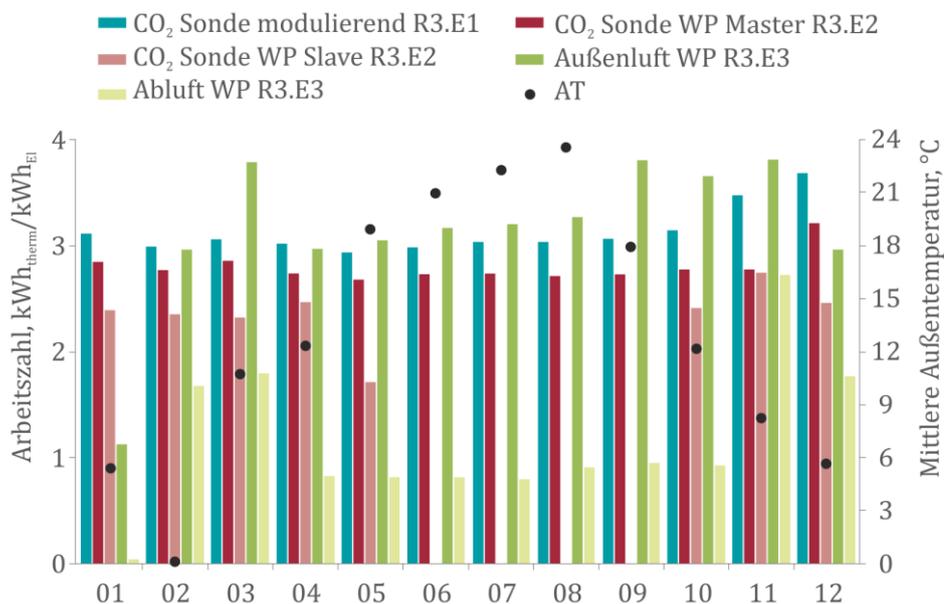


Abb. 4-11: Gegenüberstellung der monatlichen Arbeitszahlen für die fünf installierten Wärmepumpentypen von R3 und der mittleren monatlichen Außentemperatur für das Jahr 2012

In Abb. 4-11 sind die jeweiligen monatlichen Arbeitszahlen für die unterschiedlichen Wärmepumpentypen von R3 gegenübergestellt. In blau ist die Wärmepumpe von R3.E1, in Rottönen sind die Wärmepumpen von R3.E2 und in Grüntönen die beiden Wärmepumpen von R3.E3 dargestellt. Auf der rechten Skala sind die durchschnittlichen monatlichen Außentemperaturen im Jahr 2012 aufgetragen.

Die Außenluftwärmepumpe erzielt die monatlichen Arbeitszahlen, die bei den vorliegenden Temperaturen zu erwarten wären. Für die Wärmepumpe mit CO₂-Sonden von R3.E1 lässt sich eine niedrigere Arbeitszahl als für die Außenluftwärmepumpe ablesen. Dies lässt sich auf den relativ hohen Energieverbrauch für das Trinkwarmwasser in R3.E1 im Gegensatz zu R3.E3 zurückführen.

4.3.5 Vergleich der Heizwärmeverbrauchsdaten

Bereits im Jahr 2012 veröffentlichte beispielsweise Dall'O (Dall'O' et al. 2012) einen Artikel mit der Erkenntnis, dass eine Messdatenanalyse Aufschluss über variierendes Nutzerverhalten gibt.

In *Abb. 4-12* sind die monatlichen Heizwärmeverbräuche aller Wohnungen von R2 und R3 über die Jahre 2012 bis 2014 bei den jeweiligen mittleren Außentemperaturen aufgetragen. Wie zu erwarten ist, reduzieren sich die Verbräuche bei steigender Außentemperatur. Bei mittleren Außentemperaturen um den Gefrierpunkt sind deutliche Häufungen der Verbrauchswerte im Bereich bis $12 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Monat})$ zu erkennen. Im Bereich von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ist eine Verbrauchshäufung bis $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Monat})$ festzustellen. Darüber hinaus sind ebenfalls Einzelwerte größer $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Monat})$ ablesbar. Ein Indiz für individuelles Nutzerverhalten ist deutlich bei Außentemperaturen über $16 \text{ }^\circ\text{C}$ erkennbar. Trotz mittlerer Außentemperaturen über der Heizgrenze sind Heizwärmeverbräuche vorhanden.

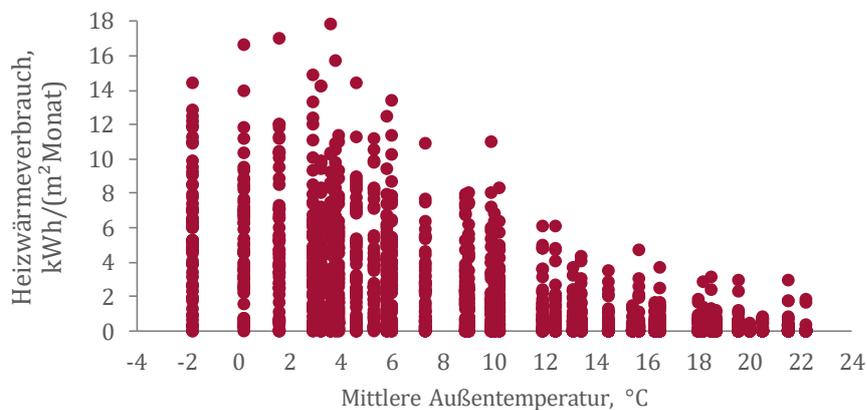


Abb. 4-12: Monatliche Heizwärmeverbräuche pro Wohnung (R2 und R3) bei mittlerer Außentemperatur über die Jahre 2012 bis 2014

Abb. 4-13 bis *Abb. 4-15* stellen den Heizwärmeverbrauch für die 60 Wohnungen von R2 und R3 für die Jahre 2012 bis 2014 gegenüber. Für die drei betrachteten Jahre ergeben sich unterschiedliche Verteilungen in Bezug auf den Heizwärmekonsum. Es ist eine Spannweite des Heizwärmeverbrauchs zwischen 1 und $85 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ feststellbar. Während sich für das Jahr 2012 und 2013 nahezu gleiche Durchschnittswerte des Heizwärmeverbrauchs von $25,3$ bzw. $26,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ergeben, reduziert sich dieser Mittelwert im Jahr 2014 deutlich und zwar um ca. 37% auf $16,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Im Jahr 2012 und 2013 können lediglich sieben Wohnungen identifiziert werden, die mehr als $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ Heizwärme verbrauchen. 2014 reduziert sich die Anzahl auf vier Wohnungen mit einem Heizwärmeverbrauch von mehr als $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. 2014 war ein sonniges und warmes Jahr; dies ist sicherlich ein Grund dafür, dass die Verbrauchswerte geringer ausfallen. Aufgrund von höheren Außentemperaturen wird weniger Heizwärme konsumiert, da zur Erreichung der gewünschten Innenraumtemperatur weniger Heizenergie notwendig ist.

Aber nicht nur die Anzahl der Wohnungen mit einem erhöhten Heizwärmeverbrauch hat sich im Jahr 2014 verändert, sondern auch die Verteilung über die 60 Wohnungen. *Abb. 4-13* bis *Abb. 4-15* zeigen außerdem, dass 15 der 60 Wohnungen im Jahr 2014 weniger als 5 kWh/(m²a) und in Summe 33 Wohnungen weniger als 15 kWh/(m²a) verbrauchen.

Durch die Lage der Wohnung im Gebäude bspw. Randbereich, damit einhergehend unterschiedliche wärmeübertragende Umfassungsfläche, ergibt sich eine gewisse Schwankung des Verbrauchs. Die sich hier ergebende Varianz der Verbrauchswerte lässt sich aber nicht nur auf diesen Parameter zurückführen.

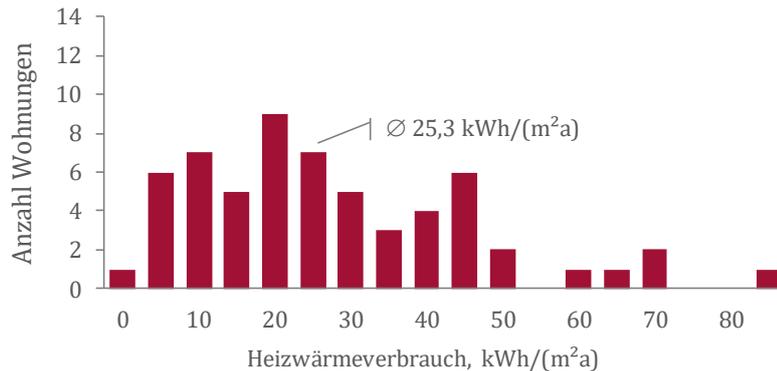


Abb. 4-13: Verteilung des spezifischen Heizwärmeverbrauchs für R2 und R3 im Jahr 2012

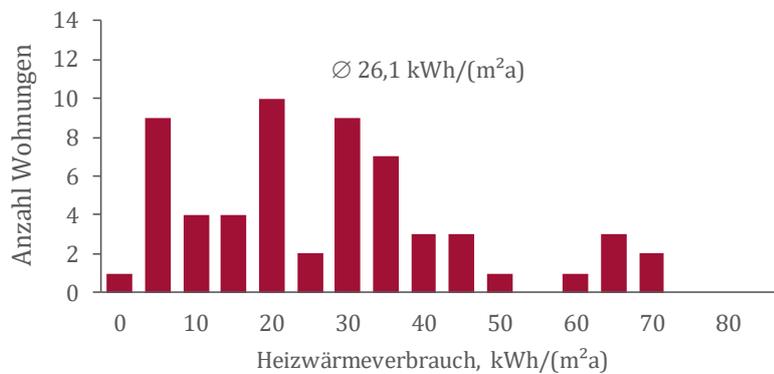


Abb. 4-14: Verteilung des spezifischen Heizwärmeverbrauchs für R2 und R3 im Jahr 2013

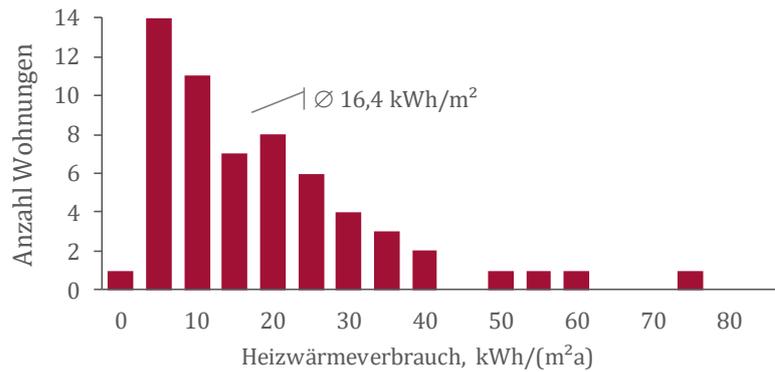


Abb. 4-15.: Verteilung des spezifischen Heizwärmeverbrauchs für R2 und R3 im Jahr 2014

4.3.6 Ergebnisse des Trinkwarmwasserverbrauchs

Ein deutlich homogeneres Bild in der Verbrauchsverteilung ergibt sich in den Jahren 2012 und 2014 für den Trinkwarmwasserkonsum und dem damit einhergehenden Energieverbrauch. Im Gegensatz zum Heizwärmeverbrauch stehen für den Vergleich des Trinkwarmwasserenergieverbrauchs - dezentrale Trinkwarmwassersysteme - nur 40 Wohnungen zur Verfügung. 10 Wohnungen aus R2.E1 und alle 30 Wohnungen von R3. In den Eingängen wurden jeweils dezentrale Trinkwarmwassersysteme verbaut, die einen Vergleich des wohnungsweisen Energieverbrauchs ermöglichen.

In Abb. 4-16 bis Abb. 4-18 ist der Trinkwarmwasserenergieverbrauch für alle Wohnungen in den Jahren 2012 bis 2014 bezogen auf Quadratmeter Nutzfläche A_N aufgetragen. Bei den hier aufgetragenen Werten handelt es sich um reine Verbrauchswerte, die an der Wohnungsgrenze gemessen wurden. Verteil- oder Speicherverluste sind hierin nicht enthalten.

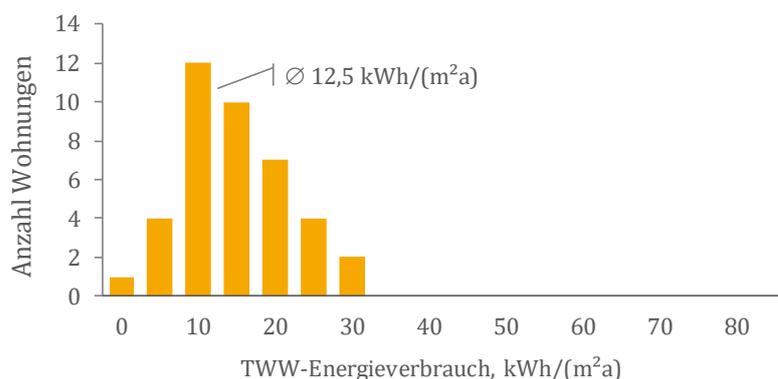


Abb. 4-16: Verteilung des spezifischen Trinkwarmwasserenergieverbrauchs für R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3 im Jahr 2012

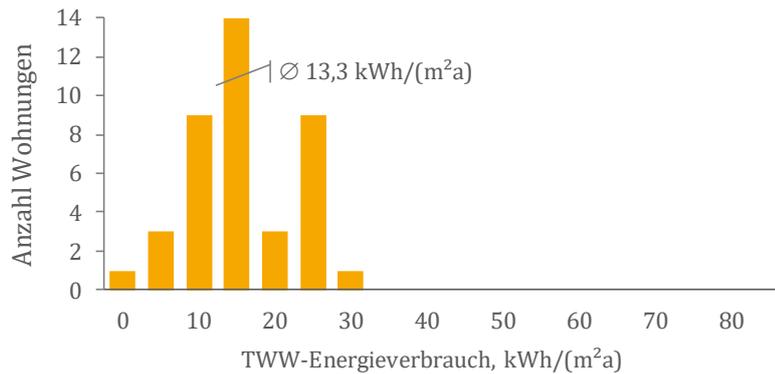


Abb. 4-17: Verteilung des spezifischen Trinkwarmwasserenergieverbrauchs für R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3 im Jahr 2013

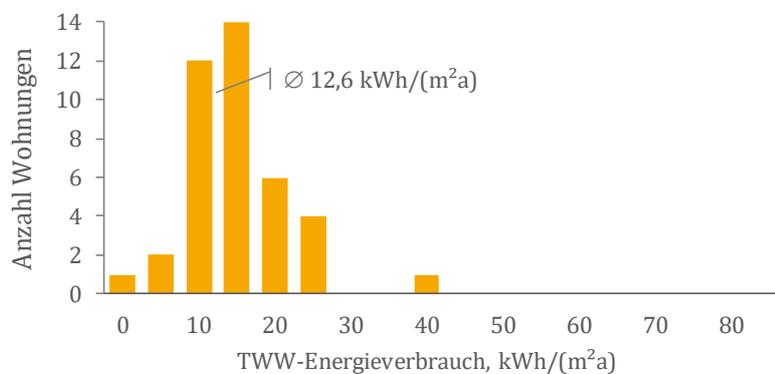


Abb. 4-18: Verteilung des spezifischen Trinkwarmwasserenergieverbrauchs für R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3 im Jahr 2014

Eine nahezu gleiche Verteilung der Verbräuche lässt sich für die Jahre 2012 und 2014 feststellen, wobei in 2014 ein Ausreißer im Bereich von 40 kWh/(m²a) vorhanden ist. Im Jahr 2013 ist der durchschnittliche Verbrauch gegenüber 2012 um 6 % auf 13,3 kWh/(m²a) angestiegen und in 2014 wieder auf den durchschnittlichen Wert von 2012. In 2013 ergibt sich im Gegensatz zu den Vergleichsjahren eine andere Verteilung der Verbrauchswerte, mit einem Einbruch bei 20 kWh/(m²a).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass mehr als 43 % der betrachteten Wohnungen in 2012 und 2014 weniger als 10 kWh/(m²a) zur Erwärmung des Trinkwarmwassers benötigen. Durch die unterschiedliche Belegung der Wohnung, ein bis vier-Personen-Haushalt, sowie eine variierende Häufigkeit und Dauer der Dusch- oder sogar Badevorgänge, ergibt sich die Varianz der vorliegenden Verbrauchswerte.

4.3.7 Vergleich des Trinkwarmwasser- und Heizwärmeverbrauchs für Riegel R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3

Nach der separaten Betrachtung der Energieverbräuche für die Trinkwarmwasserbereitung und Heizung wird in diesem Kapitel die prozentuale Aufteilung der monatlichen Energieverbräuche für die Trinkwarmwasserbereitung und Heizwärme für R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 für die Jahre 2012 bis 2014 gegenübergestellt (siehe *Abb. 4-19* bis *Abb. 4-21*).

In den drei betrachteten Jahren ergibt sich der erwartete Verlauf. Eine Reduzierung des Heizwärmeverbrauchs außerhalb der Heizperiode bei gleichzeitiger Zunahme des Energieverbrauchs für die Erzeugung des Trinkwarmwassers. *Abb. 4-19* zeigt, dass sich auch Heizwärmeverbräuche (für alle Eingänge) in den Sommermonaten ergeben, und zwar bis zu einem 25 %-igen Anteil am Energieverbrauch, bspw. im August 2012 für R3.E3. Im Jahr 2013 reduzieren sich die Anteile für die Heizwärme deutlich. Ausreißer sind weiterhin für R3.E3 erkennbar. Im Jahr 2014 sind für alle Sanierungen wieder Heizwärmeverbräuche ablesbar.

Über die Jahre reduziert sich der durchschnittliche Heizwärmeverbrauch über alle 40 Wohnungen von 20,5 kWh/(m²a) um knapp 27 % auf 15,1 kWh/(m²a). Als möglicher Grund für die Reduzierung ist die geänderte Heizgrenztemperatur anzuführen, die in den beiden Jahren zwischen 15 und 17 °C variiert wurde. Das weiterhin ein Heizenergieverbrauch abgelesen werden kann, liegt an den jeweiligen Mietern und deren Wunsch nach einer erhöhten Innenraumtemperatur, aber auch an fehlerhaft eingestellten Thermostatventilen bzw. defekten dezentralen Heizungspumpen. Der durchschnittliche Verbrauch für die Trinkwarmwasserbereitstellung bleibt über die Jahre nahezu konstant, und schwankt lediglich zwischen 12,53 und 12,12 kWh/(m²a).

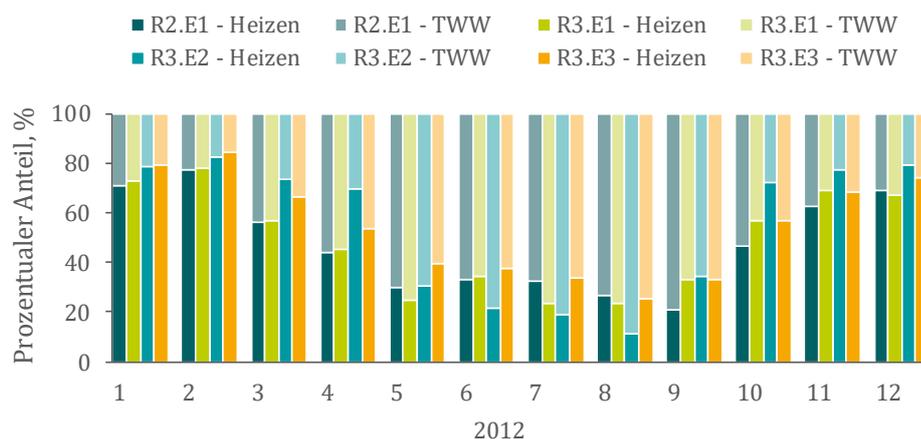


Abb. 4-19: Aufteilung der monatlichen Energieverbräuche für Trinkwarmwasser und Heizwärme für R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 für das Jahr 2012 in Prozent

Für das Jahr 2012 ergibt sich eine maximale Abweichung des Heizwärmeverbrauchs von 12 % vom Durchschnittsverbrauch, der bei 20,52 kWh/(m²a) liegt. Für den Bereich Trinkwarmwasser ist eine maximale Abweichung von 16 % vom durchschnittlichen Energiever-

brauch für die Trinkwarmwassererzeugung von $12,53 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ablesbar. Bei der detaillierten Betrachtung der Verbräuche der einzelnen Wohnungen zeigt sich, dass Abweichungen von bis zu 111 % über den durchschnittlichen Heizwärmeverbrauch des entsprechenden Riegels festgestellt werden, aber auch Unterschreitungen von 4 %. Für den Bereich Energieverbrauch für die Trinkwarmwassererzeugung sind größere Abweichungen ablesbar, und zwar Überschreitungen von bis zu 180 % und Unterschreitungen von bis zu 24 % des Durchschnittswertes des entsprechenden Eingangs.

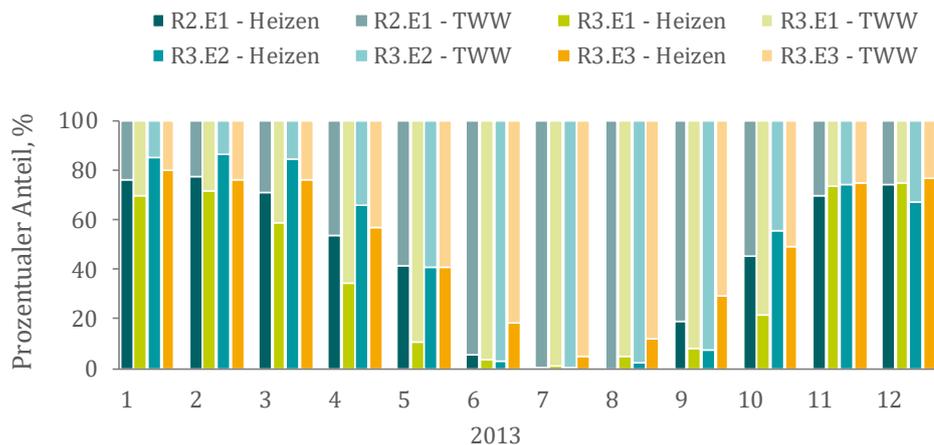


Abb. 4-20: Aufteilung der monatlichen Energieverbräuche für Trinkwarmwasser und Heizwärme für R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 für das Jahr 2013 in Prozent

Im Jahr 2013 ist eine Überschreitung von 35 % über den durchschnittlichen Heizwärmeverbrauch von $21,83 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bei R3.E2 erkennbar. R3.E1 unterschreitet diesen Durchschnittswert um 38 %. Bei der Betrachtung der monatlichen Verbräuche der einzelnen Wohnungen sind Abweichungen von bis zu 193 % mit $69,25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ für R3.E3.W5 vom Jahresdurchschnittsverbrauch des Riegels R3 und gleichzeitig eine maximale Unterschreitung des Durchschnittsverbrauchs für R2.E1.W6 vorhanden. Im Bereich des Energieverbrauchs zur Trinkwarmwassererzeugung sind im gleichen Jahr – in anderen Wohneinheiten – Überschreitungen von 123 % und Unterschreitungen von 73 % festzustellen.

Im Jahr 2014 (siehe Abb. 4-21) ist eine deutlich inhomogene Verteilung der Verbrauchswerte sowohl für den Bereich Heizung als auch Trinkwarmwasser erkennbar. Die Heizwärmeverbräuche in den Sommermonaten steigen wieder deutlich an, besonders für R3.E3, obwohl sich der geringste durchschnittliche Heizwärmeverbrauch von $15,11 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ einstellt. Es ergibt sich eine 13 %-ige Überschreitung sowie eine 23 %-ige Unterschreitung des Heizwärmedurchschnitts.

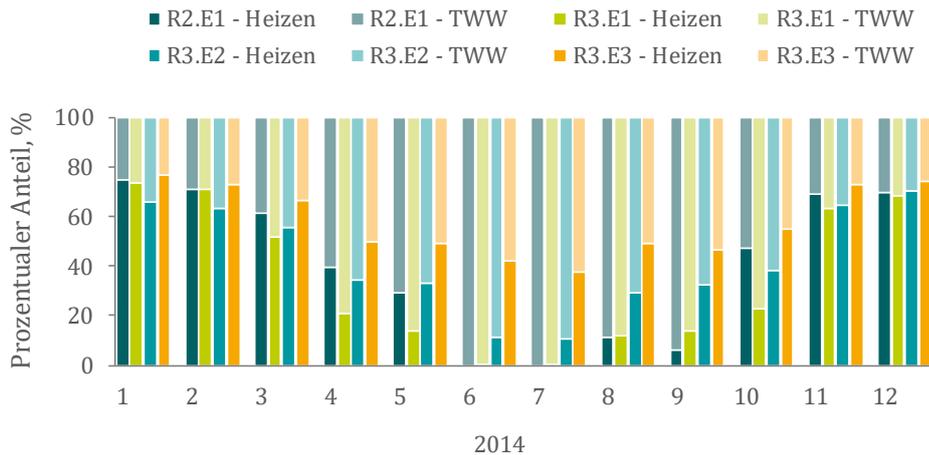


Abb. 4-21: Aufteilung der monatlichen Energieverbräuche für Trinkwarmwasser und Heizwärme für R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 für das Jahr 2014 in Prozent

Die Abweichungen vom Durchschnitt ($12,12 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) im Bereich Trinkwarmwasser ist nicht so ausgeprägt. Für R3.E2 ist die größte Abweichung nach oben und für R3.E1 nach unten ablesbar. Auch hier sind bei der wohnungsweisen Betrachtung deutliche Abweichungen nach oben von 324 % für R3.E3.W4 und 94 % Unterschreitung für R3.E2.W4 für den Bereich Heizwärme erkennbar. Der größte Energieverbrauch für die Trinkwarmwasserbereitung mit 171 % ergibt sich für R3.E2.W3 und der geringste Verbrauch mit einer Unterschreitung des Durchschnittswertes von 78 %.

4.3.8 Gegenüberstellung des Gesamtenergieverbrauchs für Riegel R2.E1 und R3.E1

Neben der Auswertung der Verbrauchsdaten besteht durch das umfangreiche Monitoring auch die Möglichkeit, die jeweils entstehenden Verluste zu bilanzieren. Neben der Gesamtwärmebilanz lassen sich die Energieverluste im Speicher sowie bei der Verteilung des Heizungs- und Trinkwarmwassers ermitteln. In *Abb. 4-22* und *Abb. 4-23* ist der Gesamtenergieverbrauch für die beiden Sanierungsvarianten von R2.E1 und R3.E1 für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 gegenübergestellt. Der jeweils ersten Spalte ist der Durchschnittswert für die einzelnen Parameter über den betrachteten Zeitraum aufgetragen.

Für R2.E1 lässt sich ein durchschnittlicher Gesamtenergieverbrauch von $6 \text{ kWh}/\text{m}^2$ für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 ablesen. Der Gesamtverbrauch teilt sich in zwei gleiche Teile auf. $3 \text{ kWh}/\text{m}^2$ werden tatsächlich verbraucht, $2 \text{ kWh}/\text{m}^2$ für Heizen (orange) und $1 \text{ kWh}/\text{m}^2$ für die Trinkwarmwasserbereitung (gelb). Die restlichen $3 \text{ kWh}/\text{m}^2$ entfallen auf die entstehenden Verluste für die Speicherung, Verteilung und Heizung.

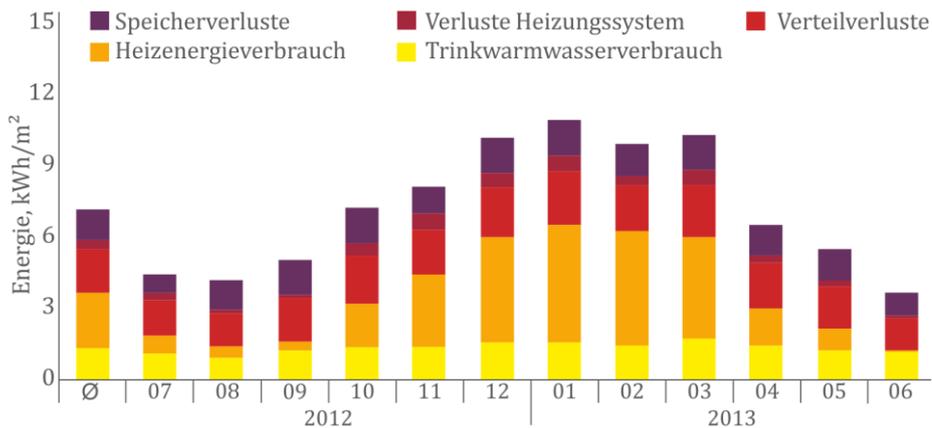


Abb. 4-22: Gesamtenergieverbrauch im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für R2.E1

Mit sinkenden Außentemperaturen steigt der Heizenergieverbrauch an, das Maximum mit 4 kWh/m^2 wird im Januar 2013 erreicht. Das Minimum hingegen kann im Juni 2013 abgelesen werden, in diesem Monat werden lediglich 3 kWh/m^2 verbraucht. Allerdings bleibt anzumerken, dass sogar in den Sommermonaten (z. B. Juli, August) ein Heizenergieverbrauch entsteht. Die entstehenden Verluste für Verteilung (hellrot) und Speicherung (dunkelrot) bleiben über den betrachteten Zeitraum nahezu konstant, während die Heizungsverluste (rot) mit steigendem Heizenergieverbrauch ansteigen.

Der Energieverbrauch für die Trinkwarmwasserbereitung verläuft während der Monate annähernd gleich. Es ergibt sich ein Wert von ca. $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{Monat})$.

Im Gegensatz zu R2.E1 kann für R3.E1 ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 4 kWh/m^2 für den Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 abgelesen werden. Allerdings machen auch in diesem Fall die Verluste 50 % des Energieverbrauchs also 2 kWh/m^2 aus.

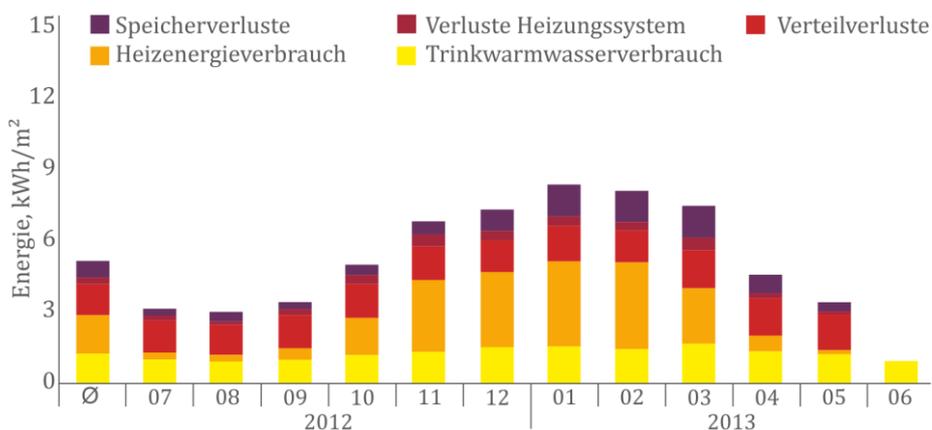


Abb. 4-23: Gesamtenergieverbrauch im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für R3.E1

Der maximale Gesamtenergieverbrauch lässt sich im Januar 2013 feststellen. Der Heizenergieverbrauch (orange) beträgt 3 kWh/m^2 , während der Energieverbrauch für die Trinkwarmwasserbereitung knapp 1 kWh/m^2 ausmacht. Weitere 2 kWh/m^2 entfallen auf die entstehenden Verluste. Im Juni 2013 ergibt sich der Gesamtenergieverbrauch lediglich

durch den Trinkwarmwasserkonsum, es entstehen weder Heizenergiekonsum noch Verluste. Die Verteil- (hellrot) und Speicherverluste (dunkelrot) bleiben über den Betrachtungszeitraum nahezu konstant, während auch hier die Heizungsverluste (rot) mit dem Heizenergieverbrauch ansteigen.

Der Energieverbrauch für die Trinkwarmwasserbereitung beläuft sich im Betrachtungszeitraum auf monatlich knapp 1 kWh/m², wie im Fall von R2.E1.

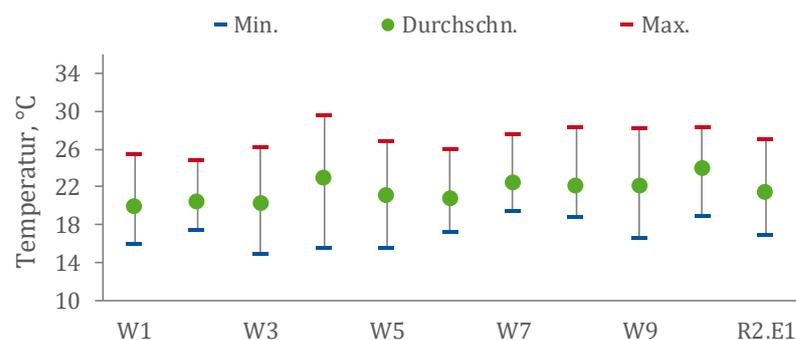
4.4 Innenraumzustände und Nutzerverhalten

Das Nutzerverhalten wird beschrieben durch Annahmen zur Innenraumtemperatur, zur Luftqualität, zum Luftwechsel, Trinkwarmwasserbedarf und der internen Wärmelast aus der Nutzung elektrischer Geräte, u. v. m.. In den Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Bedarfswerte werden entsprechende Kennwerte vorgegeben. In den folgenden Kapiteln wird auszugsweise für die Heizperiode 2012 dargestellt, welche Werte sich nach der energetischen Modernisierung in den einzelnen Eingängen der Riegel R2 und R3 eingestellt haben.

4.4.1 Gemessene Wohnungstemperaturen

In *Abb. 4-24* und *Abb. 4-25* sind die durchschnittlichen Wohnungstemperaturen für das Jahr 2012 der jeweiligen Wohnungen des entsprechenden Eingangs gegenübergestellt. Die hier dargestellten Messwerte wurden im Vorfeld um den Korrekturfaktor von 2,5 K reduziert (siehe 4.1.1). Der Mittelwert (grün) ergibt sich als zeitlicher und flächengewichteter Durchschnittswert aller Räume der betrachteten Wohnungen. Der Minimal- (blau) und Maximalwert (rot) wurden auf die gleiche Weise berechnet; einzelne Ausreißer werden nicht dargestellt.

Für R2.E1 lässt sich für W3 die geringste Wohnungstemperatur von 14,5 °C ablesen. Der höchste gemessene Wert in diesem Eingang ist in W4 vorzufinden. Die geringste durchschnittliche Wohnungstemperatur von 19,9 °C ergibt sich für W1 und die höchste durchschnittliche Temperatur mit 24,0 °C für W10. Für R2.E1 ergibt sich eine durchschnittliche Wohnungstemperatur von 21,5 °C. W1 weicht im Jahr 2012 um 7,5 % nach unten und W10 um 11,6 % nach oben von diesem Wert ab.



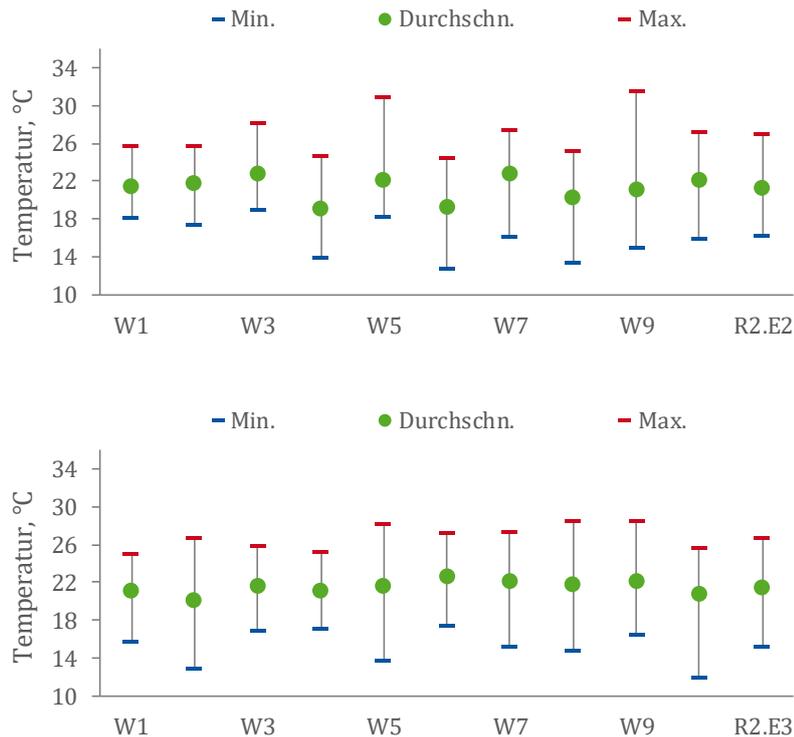


Abb. 4-24: Gegenüberstellung der Wohnungstemperaturen für R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) während der Heizperiode 2012

Für R2.E2 liegt die durchschnittliche Wohnungstemperatur mit 21,3 °C im Bereich von R2.E1. Die maximale Abweichung der mittleren Temperatur liegt 7,5 % über dem Durchschnitt und die minimale Abweichung zur mittleren Temperatur bei -10,3 %. Die minimalen und maximal feststellbaren Werte weichen in R2.E2 deutlich von den Werten von R2.E1 ab. Während der maximale Wert zu 31,6 °C ergibt, liegt der Minimalwert bei 12,8 C.

Auch für R2.E3 kann eine durchschnittliche Wohnungstemperatur von 21,5 °C abgelesen werden. Die maximale Unterschreitung dieses Wertes mit einer Temperatur von 20,1 °C (-6,5 %) kann für W2 und die maximale Überschreitung des Wertes mit einer Temperatur von 22,6 °C (5,1 %) für W6 festgestellt werden. Die niedrigste mittlere Innenraumtemperatur beläuft sich auf 11 °C für W10; die höchste Temperatur lässt sich bei 38,5 °C für W8 ablesen.

Für R3 ergibt sich im Mittel eine um ein Kelvin höhere mittlere Innenraumtemperatur (22,3 °C) gegenüber Riegel R2. R3.E1 weist in W9 (15,8 °C) die geringste und in W8 (35,5 °C) die höchste durchschnittliche Innenraumtemperatur auf. Die größte Abweichung nach unten vom Mittelwert kann für W2 mit 4,7 % und nach oben für W4 mit 8,8 % abgelesen werden.

Für W9 in R3.E2 ergibt sich mit 11,3 °C die niedrigste und für W7 mit 18,0 °C die höchste minimale Innenraumtemperatur. Für W9 kann ebenfalls die geringste und für W10 die

größte maximale Wohnungstemperatur festgestellt werden. W9 unterschreitet die durchschnittliche Wohnungstemperatur um 13,4 %. Im Gegensatz dazu überschreitet W5 den Wert um 6,5 %.

In R3.E3 liegt für W7 die geringste mittlere Wohnungstemperatur mit 11,7 °C vor. Für W1 ergibt sich mit 34,5 °C die höchste vorkommende mittlere Wohnungstemperatur. Bezogen auf den Mittelwert kann für W7 eine 13,6 %-ige Unterschreitung und für W10 eine 8,1 %-ige Überschreitung des Durchschnittswertes von 22,3 °C ermittelt werden.

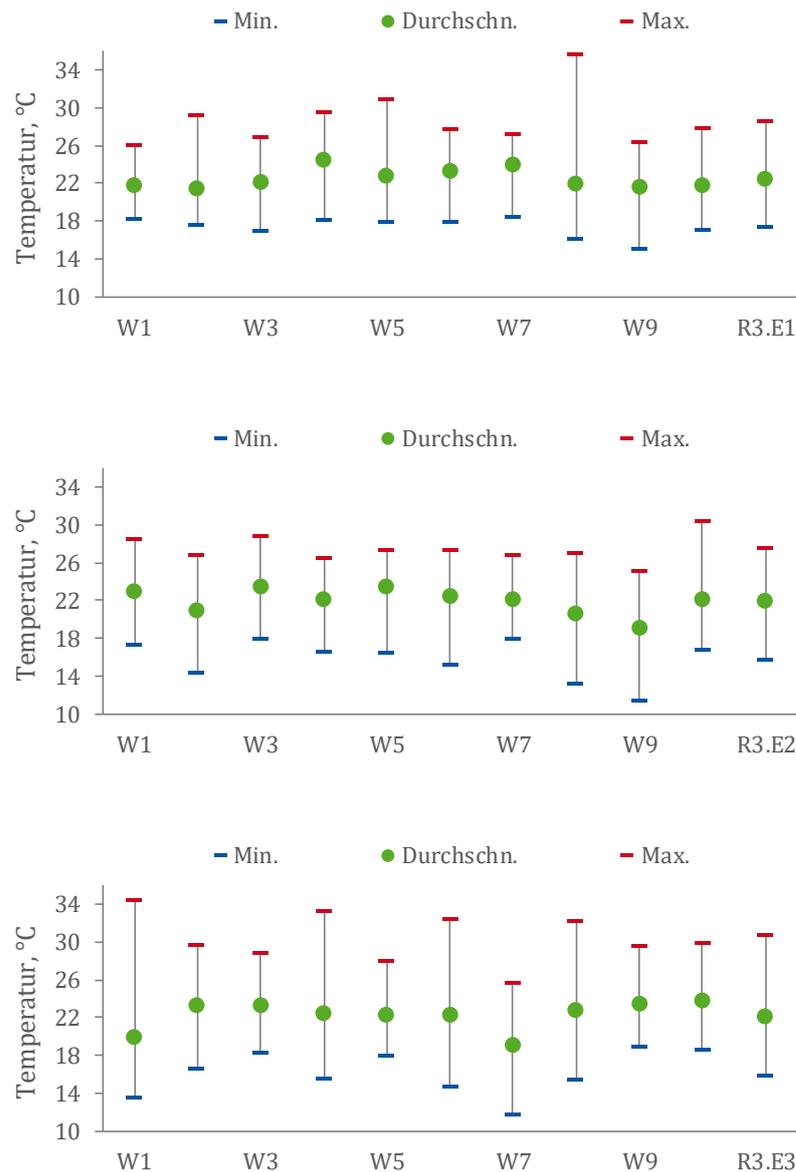


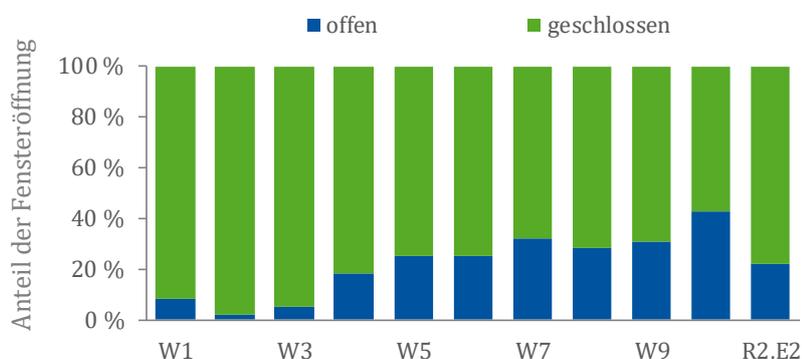
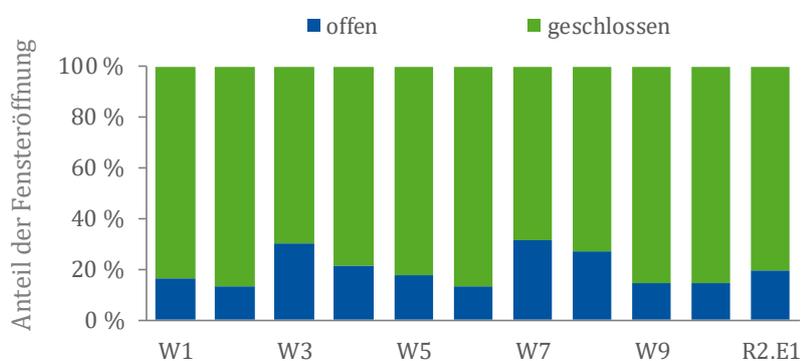
Abb. 4-25: Gegenüberstellung der Wohnungstemperaturen für R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) während der Heizperiode 2012

4.4.2 Fensteröffnungsverhalten

Im Zuge der Sanierung wurden Fensterkontakte in den Fensterflügeln eingebaut. Über das Monitoring werden die Daten zur Fensterposition – geöffnet oder geschlossen – aufgezeichnet. Anhand der Daten ist es nicht möglich eine Aussage über die Fensteröffnungsposition – gekippt oder komplett geöffnet – zu treffen. In *Abb. 4-26* und *Abb. 4-27* ist der prozentuale Anteil an geschlossenen (grün) und geöffneten (blau) Fenstern pro Wohnung für R2 und R3 in der Heizperiode 2012 gegenübergestellt.

Wie aus *Abb. 4-26* zu entnehmen ist, sind in R2.E1 die Fenster der Wohnung über 19 % des Betrachtungszeitraums geöffnet. Während W7 mit einer 31 %-igen Fensteröffnungshäufigkeit 63 % über dem Durchschnitt liegt, unterschreitet W6 mit 13,4 % den Durchschnittswert um 29,5 %. R2.E2 weicht im Durchschnitt nur minimal von den Werten von R2.E1 ab. Allerdings ist eine größere Varianz der Einzelwerte ablesbar. W10 hat während 57,6 % die Fenster geschlossen, liegt damit 26 % über dem Durchschnitt. W2 unterschreitet mit 1,8 % Fensteröffnungshäufigkeit den Durchschnittswert um 92 %. Im Durchschnitt bleiben in R2.E3 die Fenster im Jahr 2012 zu 82,7 % geschlossen. W5 hat zu 68,3 % die Fenster geschlossen und W10 zu 96,8 %. Der Durchschnittswert der Fensteröffnungshäufigkeit wird in W5 um 83,3 % über- und in W10 um 81,5 % unterschritten.

Obwohl R2.E1 über dezentrale Lüftungsgeräte in den Aufenthaltsräumen verfügt, unterscheidet sich das Lüftungsverhalten zwischen den einzelnen Eingängen des Riegels R2 nur kaum von einander.



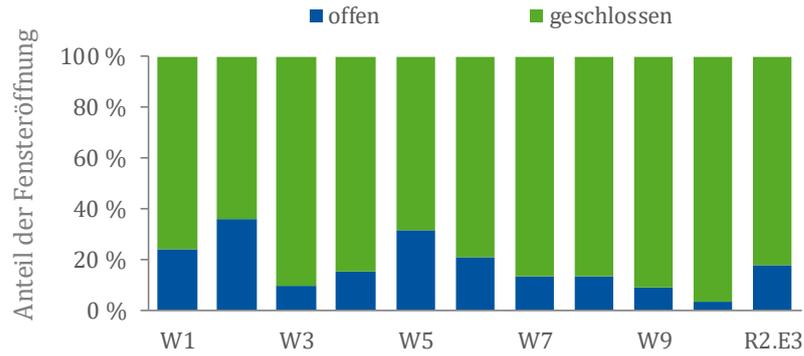


Abb. 4-26: Anteil der Fensteröffnung pro Wohnung für R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) an der Heizperiode 2012

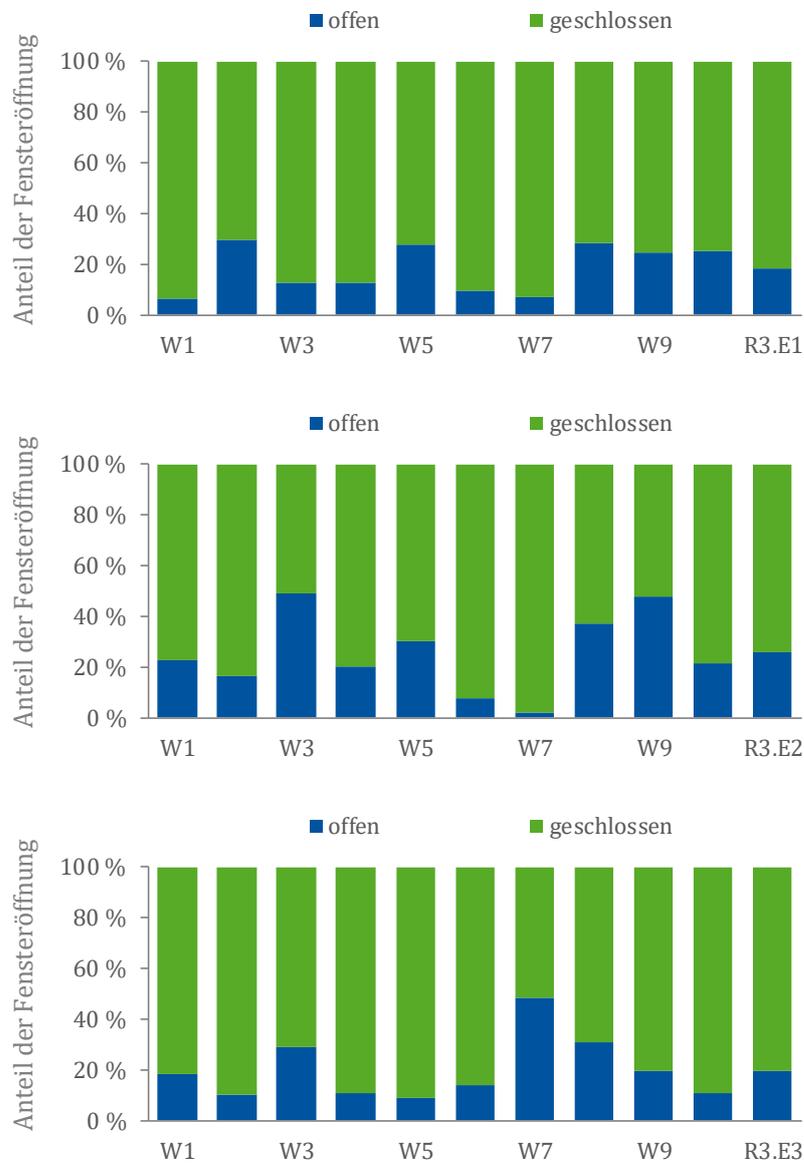


Abb. 4-27: Anteil der Fensteröffnung pro Wohnung für R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) an der Heizperiode 2012

In *Abb. 4-27* ist das Fensteröffnungsverhalten für R3 wohnungsweise während der Heizperiode 2012 gegenübergestellt. In R3.E1 sind die Fenster im Durchschnitt über alle Wohnungen 82,1 % des Betrachtungszeitraums geschlossen. Für W2 dieses Eingangs ist die größte Fensteröffnungshäufigkeit mit 29,1 % (65 %-ige Überschreitung des Durchschnittswertes) und für W1 die geringste Fensteröffnungshäufigkeit mit 6,3 % und damit eine Unterschreitung des Durchschnittswertes um 65 % ablesbar.

Für R3.E2 weichen die durchschnittlichen Werte um ca. 45 % von den Werten aus R3.E1 ab, die Fenster werden häufiger geöffnet (26 %). In W9 bleiben die Fenster 51 % des Jahres 2012 geschlossen, in W7 hingegen 98 % der Zeit. Die Werte für R3.E3 liegen eher im Bereich der Werte von R3.E1. 80 % des Jahres bleiben die Fenster der Wohnungen geschlossen. Die Fensteröffnungshäufigkeit schwankt in diesem Eingang deutlich. Während W5 die durchschnittlichen Werte um 113 % überschreitet, kann für W7 eine Unterschreitung der Fensteröffnungshäufigkeit um 35 % festgestellt werden.

Zusammenfassend kann ebenfalls für R3 festgestellt werden, dass kein eindeutiger Unterschied zwischen den Wohnungen mit und ohne Lüftungstechnik ermittelt werden kann. Die Wohnungen in R3.E2 mit Luftheizung haben im Vergleich zu den anderen Sanierungsvarianten mit 26 % die größte Fensteröffnungshäufigkeit.

4.4.3 Gemessene relative Feuchte

Empfehlungen für die relative Luftfeuchte liegen in einem Bereich von minimal 30 % bis zu einem Maximalwert von 65 % (vgl. Norm DIN 1946-2). Nimmt die Luftfeuchte größere Werte an, wird das Raumklima als eher unbehaglich feucht empfunden (analog zu subtropischem / tropischem Klima). Die relative Feuchte spielt bezüglich der thermischen Behaglichkeit eine untergeordnete Rolle, wenn die Temperaturen und die zugehörigen Feuchten in der Nähe des Behaglichkeitsfeldes liegen (vgl. Norm DIN EN ISO 7730).

Für die Auswertung der Messdaten wurden die Grenzen in Anlehnung an die Normung festgelegt. Trocken (gelb) steht für Werte mit einer relativen Luftfeuchte von < 40 %. Der normale Bereich bzw. die Komfortzone (grün) liegt zwischen ≥ 40 und ≤ 60 %. Werte > 60 % (rot) werden als zu feucht bezeichnet.

Abb. 4-28 zeigt, dass für R2 über das ganze Jahr nur eine sehr geringe Feuchtephase kleiner 1 % vorhanden ist. In den Wohnungen selbst sind deutliche Unterschiede in den Werten der relativen Feuchte feststellbar. Für R2.E1 ergibt sich ein durchschnittlicher Wert von 49 % im trockenen Bereich während der Heizperiode 2012. Für W6 und W8 ist über 77 % der Zeit ein eher trockenes Wohnungsklima vorzufinden. Im gleichen Zeitraum liegt für W2 des Riegels R2 die relative Feuchte nur in 26 % der Zeit im trockenen Bereich.

Für R2.E2 ergibt sich über die Heizperiode 2012 zu 47 % ein eher trockenes und zu 1 % ein eher feuchtes Raumfeuchteklima; der übrige Zeitraum liegt im grünen Bereich. Für W1 kann zu 20 % der Zeit eine geringe und zu 5 % eine hohe relative Feuchte abgelesen werden. Im Gegensatz dazu kann für W9 in 76 % der Zeit eine eher trockene Raumluftfeuchte festgestellt werden.

Bei R2.E3 steigt der durchschnittliche Anteil des gelben Bereichs (trocken) auf 64 % der Zeit an. Der Anteil an hoher relativer Feuchte liegt bei knapp 1 %. Für W1 sinkt der Anteil an trockenerer Raumluft auf 23 % und für W8 steigt der Anteil auf 90 % im gleichen Betrachtungszeitraum.

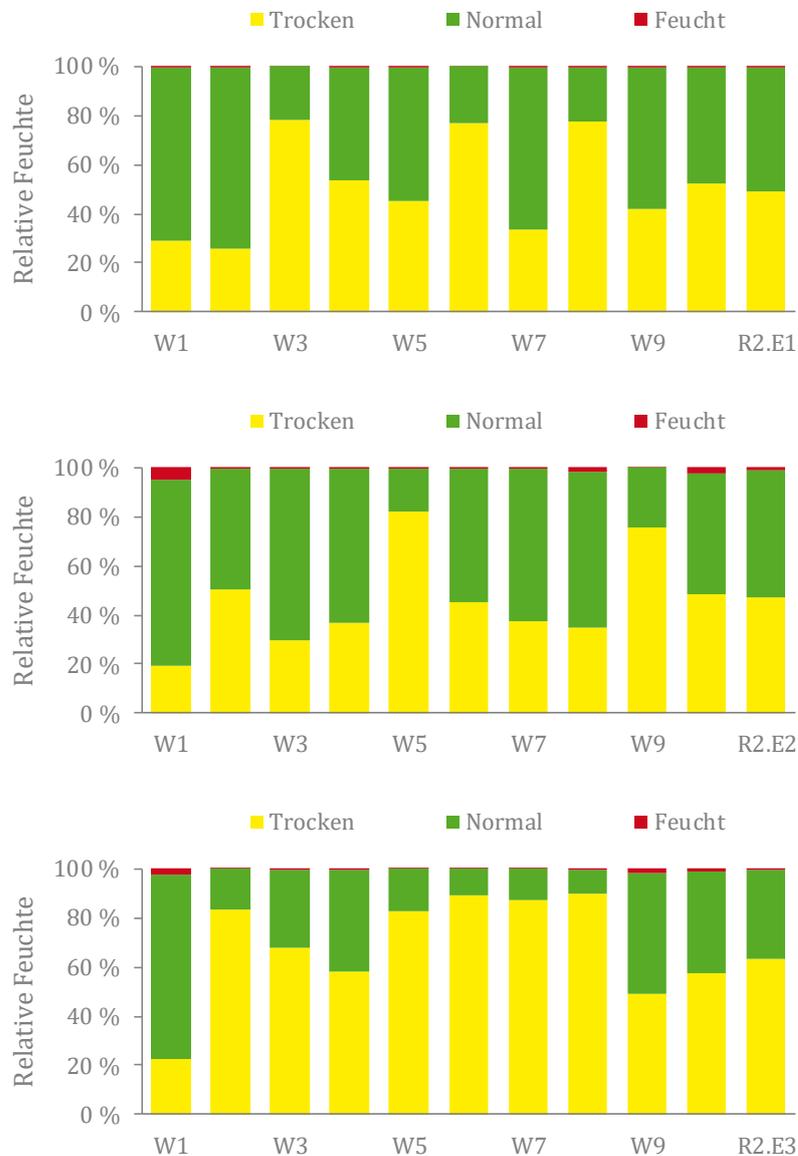


Abb. 4-28: Durchschnittliche relative Feuchte in den Wohnungen von R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) während der Heizperiode 2012

Die Abb. 4-29 macht deutlich, dass in sämtlichen Wohnungen des Riegels 3 über mehr als 78 % der Zeit eine relative Feuchte kleiner als 40 % herrscht. Es ist also eher trocken in den Wohnungen. In R3.E1 ist auffällig, dass es sogar eine Wohnung gibt (W4) die zu 98 % der Zeit eine eher trockene Raumluft aufweist. W1 liegt mit 60 % knapp 40 % unter dem Wert von W4 und 26 % unter dem Durchschnittswert.

W7 aus R3.E2 weist zu 7 % der Zeit eine erhöhte relative Feuchte (größer 60 %) auf. Im Gegensatz dazu ist es zu 51 % der restlichen Zeit eher trocken. Im Durchschnitt ergibt sich

für R3.E2 ein Anteil von 78 % geringer und 1 % hoher relativer Feuchte. Bei R3.E3 steigt der durchschnittliche Anteil an Werten < 40 % relativer Feuchte gegenüber R3.E2 an und macht damit einen Anteil von 81 % aus. Für W10 kann fast das komplette Jahr (99 %) eine geringe relative Feuchte in der Wohnung abgelesen werden. Ein akzeptabler Wert der relativen Feuchte zwischen 40 und 60 % wird in W5 zu 45 % der Zeit festgestellt.

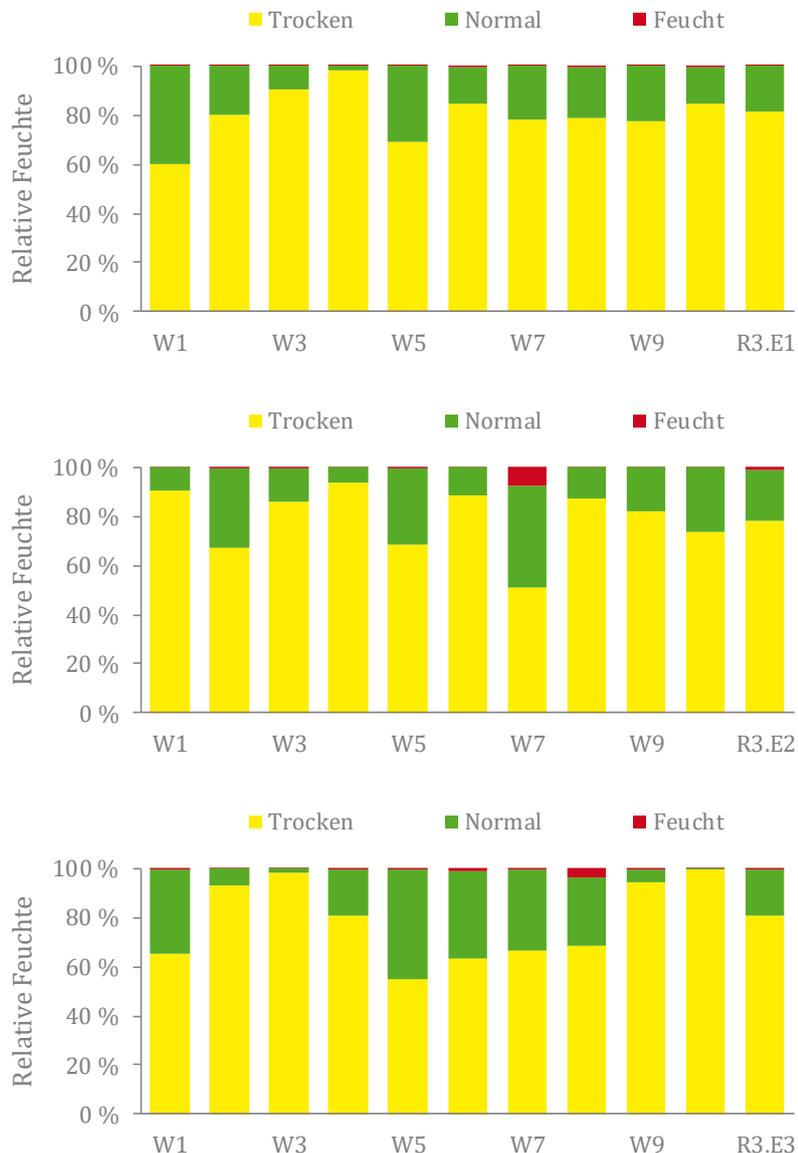


Abb. 4-29: Durchschnittliche relative Feuchte in den Wohnungen von R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) während der Heizperiode 2012

Für alle hier untersuchten Sanierungsvarianten und deren unterschiedlichen Lüftungssysteme, maschinelle Lüftung oder Fensterlüfter, kann festgestellt werden, dass sich zu keinem Zeitpunkt über einen längeren Zeitraum Innenraumzustände mit zu hoher relativer Feuchte eingestellt haben.

4.4.4 CO₂-Gehalt in den Wohnungen

Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts hat Max von Pettenkofer (Pettenkofer 1858) darauf hingewiesen, dass das Befinden des Menschen entscheidend vom CO₂-Gehalt der Luft abhängt. Bei einer Konzentration unter 0,1 % (1.000 ppm, Parts per Million) fühlten sich die Versuchspersonen wohl; bei Werten über 0,2 % unbehaglich. Die Erkenntnisse von Pettenkofer sind auch heute noch in der aktuellen Normung (Norm DIN 1946-2) vorzufinden, allerdings in etwas abgewandelter Form. Als oberen Grenzwert der CO₂-Konzentration gibt die DIN 1946-2 1.500 ppm an, empfiehlt aber den Wert von Pettenkofer von 1.000 ppm. Die Raumluftqualität hängt nicht alleine von der CO₂-Belastung ab, sondern auch von anderen Stoffen (z. B. Lösungsmittel aus Materialien und Baustoffen).

Für die Auswertung der raumweisen CO₂-Werte wurden die Grenzwerte in Anlehnung an die Normung und Literatur wie folgt gewählt: grün steht für Werte bis 1.000 ppm, gelb für Werte zwischen 1.000 und 2.000 ppm und rot für Werte über 2.000 ppm. In *Abb. 4-30* und *Abb. 4-31* sind die durchschnittlichen jährlichen CO₂-Konzentrationen in den Wohnungen für R2 und R3 gegenübergestellt.

Für R2.E1 ergibt sich, dass im Durchschnitt des Jahres zu 51 % der Zeit Werte unterhalb 1.000 ppm, 39 % der Zeit Werte zwischen 1.000 und 2.000 ppm und zu 8 % der Zeit Werte über 2.000 ppm abgelesen werden können. Die Werte im grünen Bereich schwanken um +53 % und -38 % um den Mittelwert. W5 weist mit einem prozentualen Anteil von 18 % im roten Bereich die schlechteste Raumluftqualität auf.

Für R2.E2 ist eine deutlichere Schwankung der CO₂-Werte zwischen den einzelnen Wohnungen feststellbar. Im Durchschnitt liegen die Werte im Bereich der Werte von R2.E1. Allerdings kann mit W7 eine Wohnung identifiziert werden, die zu einer eher schlechten Raumluftqualität neigt. 37 % des Jahres konnten CO₂-Werte oberhalb von 2.000 ppm, 41 % des Jahres CO₂-Werte zwischen 1.000 und 2.000 ppm sowie lediglich 20 % des Jahres Werte unterhalb 1.000 ppm gemessen werden. Dies bedeutet, dass über 75 % der Zeit die Raumluft als unbehaglich eingestuft werden kann. R2.E3 weicht mit seinen durchschnittlichen Werten deutlich von den beiden anderen Eingängen ab. Hier konnte 68 % der Zeit eine behagliche und nur zu 5 % eine unbehagliche Raumluftqualität gemessen werden. Für keine Wohnung sinkt der CO₂-Wert von größer 1.000 ppm unter die Zeitspanne von 48 % des Jahres 2012.

Im Durchschnitt können für R3.E1 behagliche CO₂-Werte abgelesen werden. 79 % der Zeit liegen die CO₂-Werte im grünen Bereich, zu 19 % im Bereich zwischen 1.000 und 2.000 ppm und lediglich in 2 % der Zeit im roten Bereich. 7 % des Jahres werden für W5 CO₂-Werte oberhalb von 2.000 ppm gemessen. Über 92 % der Zeit können für W3 CO₂-Werte unterhalb von 1.000 ppm abgelesen werden.

Die durchschnittlichen Jahreswerte der CO₂-Werte in den Wohnungen von R3.E2 liegen im Bereich der Werte von R3.E1. In W5 kann in 7 % des Jahres ein CO₂-Wert oberhalb von 2.000 ppm und in W7 über 94 % des Jahres ein CO₂-Wert unterhalb von 1.000 ppm ermit-

telt werden. Für R3.E3 werden im Jahr 2012 die behaglichsten CO₂-Werte in den Wohnungen gemessen. Nur 3 % des Jahres liegen die CO₂-Werte oberhalb von 2.000 ppm. Der Maximalwert in den Wohnungen liegt bei 7 %.

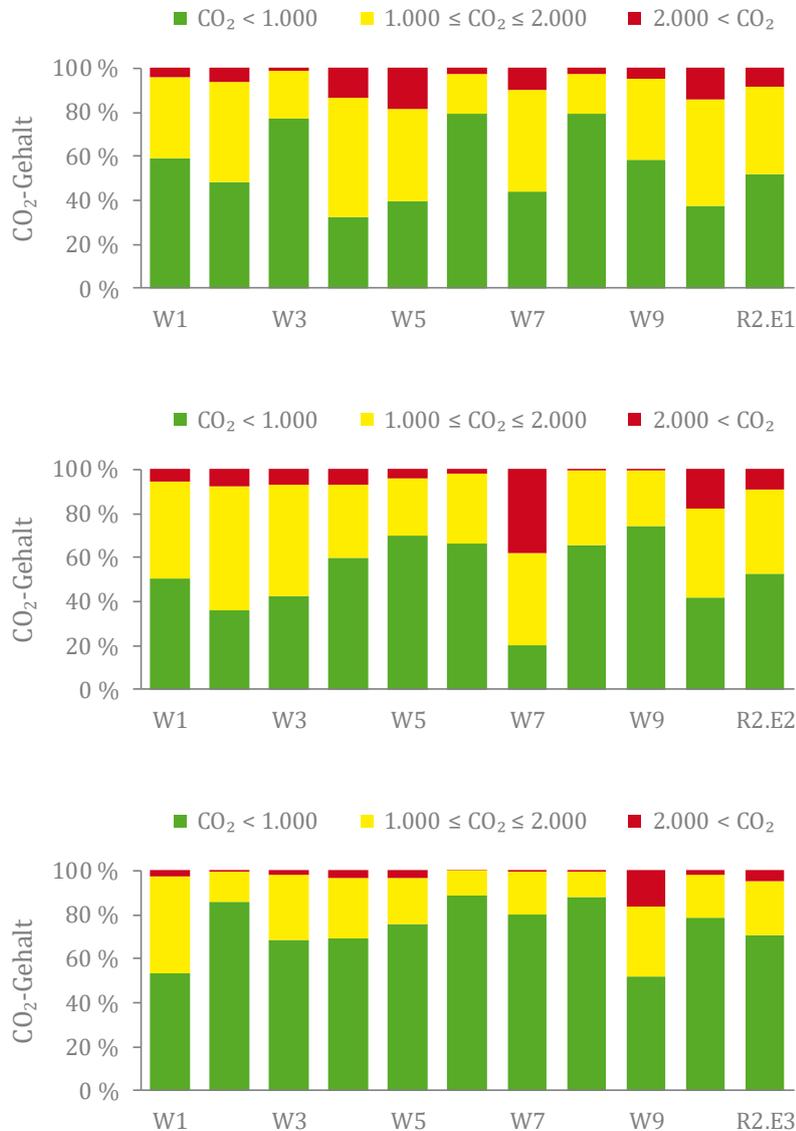


Abb. 4-30: Gegenüberstellung des durchschnittliche CO₂-Gehaltes in den Wohnungen von R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) während der Heizperiode 2012

Im Vergleich zwischen den Wohnungen von R2 und R3 zeigt sich, dass sich durchschnittlich für die Eingänge von R3 behaglichere CO₂-Werte einstellen. Zur Einhaltung des CO₂-Grenzwertes von 1.000 ppm ist laut DIN 1946-6 ein Außenluftvolumenstrom von 30 m³/h pro Person notwendig (Norm DIN 1946-6). 20 m³/h pro Person genügen laut DIN 1946-2 bei einem CO₂-Grenzwert von 1.500 ppm (Norm DIN 1946-2).

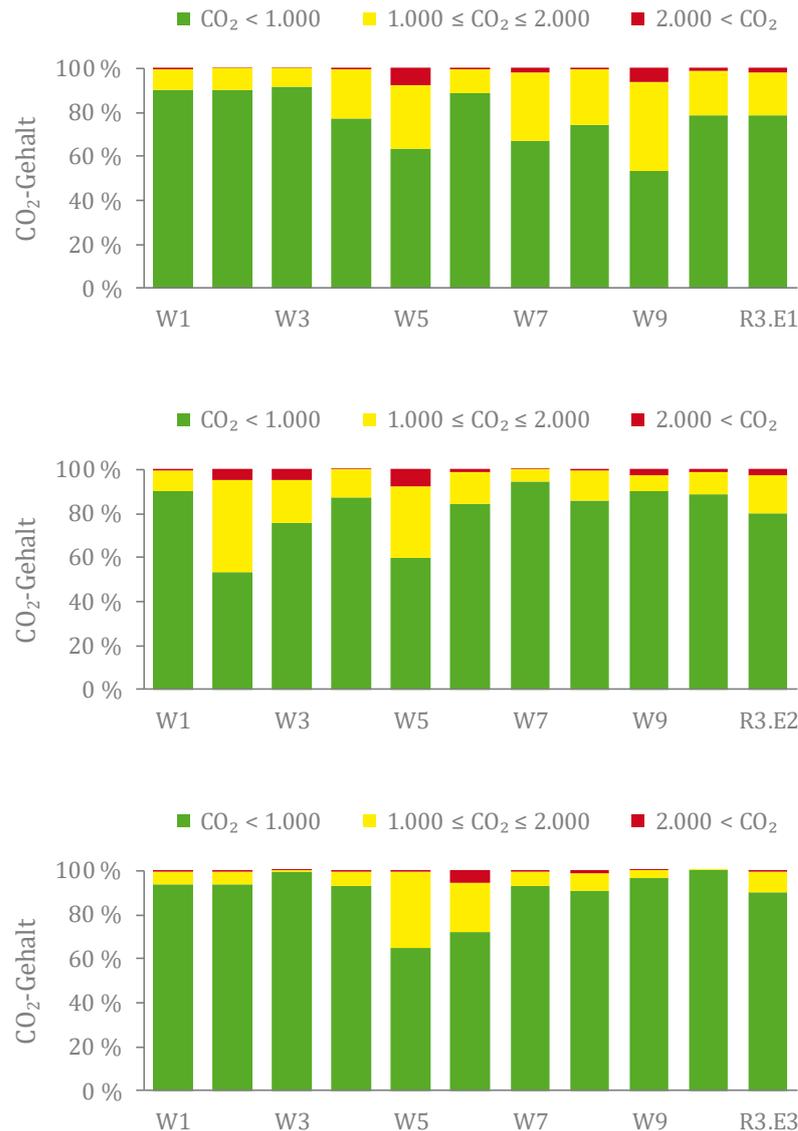


Abb. 4-31: Gegenüberstellung des durchschnittliche CO₂-Gehaltes in den Wohnungen von R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) während der Heizperiode 2012

4.4.5 Begleitende Nutzerbefragung und deren Ergebnisse

Mit einer energetischen Sanierung eines Bestandswohngebäudes wird der Zweck verfolgt, den Wohnenergiebedarf signifikant zu senken und den Wert der Immobilie zu erhöhen. Hierfür werden u. a. Gebäudetechnologien, wie beispielsweise Lüftungsanlagen und effiziente Heizungssysteme, installiert und/oder eine Dämmung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche durchgeführt. Derartige Maßnahmen setzen zur Erreichung der Einsparziele häufig ein entsprechendes Verhalten der Bewohner voraus, was sich auf die richtige Nutzung der verbauten Anlagentechnik beziehen kann. Weicht das tatsächliche Verhalten vom normativen Verhalten ab, fällt der gemessene Energieverbrauch anders aus als im Vorfeld

prognostiziert. Vor diesem Hintergrund ist ein Verständnis der zugrundeliegenden Determinanten des Energieverbrauchsverhaltens besonders im Hinblick auf die sich ergebenden Abweichungen zu den einschlägigen Normen notwendig.

Im Zuge einer Fragebogenaktion wurden 34 der 60 Mietparteien der Riegel R2 und R3 im November 2013 befragt. Die Fragen zielten dabei auf das individuelle Heiz- und Lüftungsverhalten sowie die persönliche Einschätzung des eigenen Verhaltens ab. Für die vorhandene Problemstellung wurden die Fragen individuell konfiguriert, zum einen als ja/nein-Fragen, personalisierte Fragen, aber auch als 7-Punkt-Skalen. Aus dieser Analyse ergeben sich verschiedene Perspektiven auf das spezifische, nutzerindividuelle Energieverbrauchsverhalten. Dabei ist das Bewohnerverhalten nicht nur als ökonomisch sinnvolle Reaktion auf die im Zuge der Modernisierung gesunkenen Kosten der Energieversorgung zu verstehen.

Die Befragten haben beispielsweise angegeben, wie wichtig ihnen eine Minderung der Umweltbelastung durch ein energiesparendes Verhalten ist. Die Befragungsergebnisse können mit den Messdaten in Vergleich gesetzt werden, da eine Abfrage der Verhaltensabsicht sowie der wahrgenommenen Akzeptanz stattgefunden hat. Die während der Befragung gemachten Bemerkungen der Mieter wurden ebenfalls notiert, um so weitere Rückschlüsse auf das individuelle Nutzerverhalten ziehen zu können.

Eine Frage zum Heizsystem befasst sich beispielsweise mit dem Komfortgewinn durch die neue Technik. Die Antworten sind *Abb. 4-32* zu entnehmen. -3 steht hierbei für „stimmt überhaupt nicht“ und 3 „stimmt völlig“, 0 ist neutral. Nur knapp 50 % der Befragten empfinden das neue System komfortabler, wobei nur 21 % dieser Aussage voll zustimmen. Acht von 34 der befragten Mieter können keinen Unterschied feststellen. Mehr als 32 % sind hingegen der Ansicht, dass das neue System keinen Komfortgewinn mit sich bringt.

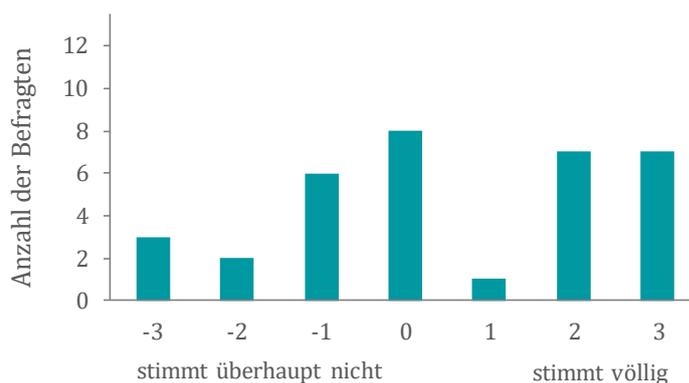


Abb. 4-32: Auswertung der Rückmeldung auf die Aussage: Seitdem wir das aktuelle Heizsystem nutzen, gestaltet sich der Umgang mit dem System komfortabler.

Nach eigener Einschätzung ist das Energiesparen bei den Verbrauchern bereits weit verbreitet. Dies hat eine Umfrage der deutschen Energieagentur dena ergeben. Allerdings werden von den Verbrauchern die noch vorhandenen Potentiale unterschätzt. Die Bereitschaft,

mehr zu tun, ist eher verhalten. Für den Bereich Heizen und den Erwerb elektrischer Geräte haben 80 % der Befragten angegeben, dass sie auf die Effizienz achten (dena 2013).

Die von der dena gemachte Feststellung kann durch die hier durchgeführte Befragung zum Thema Energieverbrauchsverhalten (siehe *Abb. 4-33*) bekräftigt werden. -3 steht hierbei für „verschwenderisch“ und 3 für „sparsam“. Während 12 von 34 Befragten der Meinung sind, sich sparsam zu verhalten, fühlen sich 13 Befragte eher neutral und lediglich knapp 9 % geben an sich verschwenderisch zu verhalten.

Energieeffiziente Sanierungen mit anlagentechnischen Besonderheiten machen ein Umdenken bei bestimmten alltäglichen Verhaltensweisen, verbunden mit dem Wohnverhalten erforderlich. Die korrekte und ausführliche Information zu den Themen Lüften und Heizen ist dabei von wesentlicher Bedeutung. Eine Untersuchung von Rohracher bzgl. der Akzeptanz von Lüftungsanlagen zeigt, dass sich fast drei Viertel der Befragten nicht oder nur ungenügend informiert fühlten. Bemängelt wird dabei, dass nicht genügend Tipps zur richtigen Verwendung und zum richtigen Lüften gegeben wurden (Rohracher, H. et al. 2001).

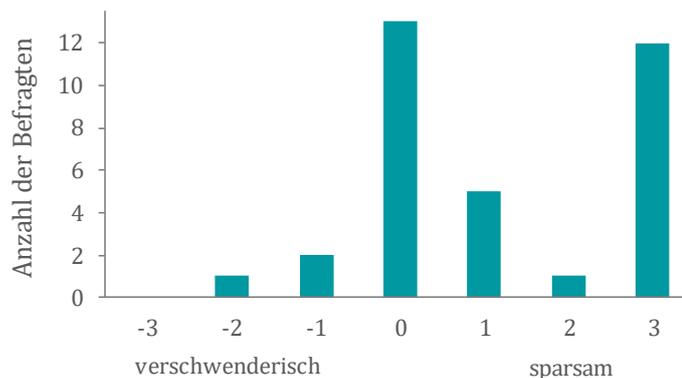


Abb. 4-33: Auswertung der Antworten auf die Frage: Auf einer Skala von -3 bis 3, wie schätzen Sie sich selbst ein, bezüglich Ihres Energieverbrauchs?

Das von Rohracher festgestellte Phänomen konnte auch bei der Befragung in Rintheim festgestellt werden. Zum Einzug wurde ein Mieterhandbuch mit Betriebsanleitungen zum korrekten Bedienen der neuen Anlagentechnik sowie Tipps zum „Verhalten“ in der energieeffizient sanierten Wohnung übergeben. Die teilweise in den sanierten Wohnungen neu installierte Lüftungstechnik wird von den Mietern dennoch nicht korrekt verwendet.

Durch die Messdatenauswertung konnten unterschiedliche Energieverbräuche in identisch sanierten Gebäuden festgestellt werden. Durch die Befragung wird überprüft, ob sich diese Unterschiede auch im Behaglichkeitsempfinden und respektive im Nutzerverhalten widerspiegeln. In *Abb. 4-34* wird der gemessene Heizwärmeverbrauch über die Anzahl der Befragten aufgetragen. Es lassen sich drei Gruppen ausmachen. Zum einen die Gruppe mit einem Heizwärmeverbrauch kleiner $21 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, dann die Gruppe mit einem Heizwärmeverbrauch zwischen $\geq 21 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und $< 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und als letztes die Gruppe mit einem Verbrauch $\geq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Erkenntnisse aus der Befragung werden nach diesen Klassen aufgeteilt.

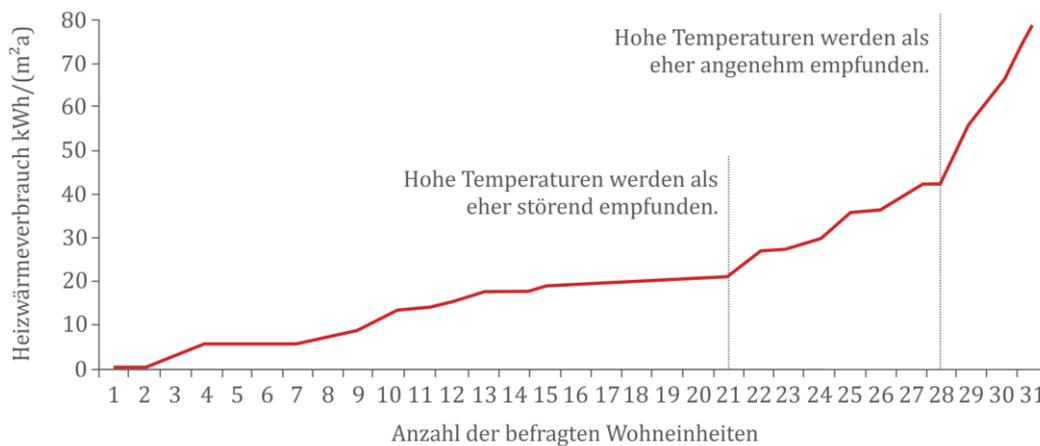


Abb. 4-34: Klassifizierung der befragten Mieter nach ihrem Heizwärmeverbrauch im Jahr 2013

Den Einstieg in die Analyse liefert eine Frage, die als Kontrollfrage bewertet werden kann. Die Relation, dass Bewohner mit einer höheren Temperatur auch einen höheren Heizwärmeverbrauch aufweisen, wird aufgezeigt. Aus Abb. 4-34 ist zu entnehmen, dass die Befragten mit einem Verbrauch $< 21 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ hohe Temperaturen als eher unangenehm wahrnehmen. Im Gegensatz dazu empfinden die Befragten mit einem Verbrauch $\geq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ hohe Temperaturen als angenehm. Diese Frage zur generellen Einstellung bezüglich des thermischen Komforts der Bewohner zeigt, dass die Antworten plausible Wirkungszusammenhänge beschreiben.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass 75 % der befragten Mieter an einer Informationsveranstaltung zur korrekten Bedienung der Anlagentechnik teilgenommen haben. Wiederum 95 % der Befragten gab an, das Mieterhandbuch erhalten zu haben; aber dies im täglichen Leben nicht zu nutzen, da sie es nach eigenen Angaben nicht benötigen bzw. ihnen zu umständlich ist. Als Folge dieser Erkenntnis wurden einige spezifische Bedienungsanleitungen, bspw. der Lüftungstechnik, auf Karteikartengröße zusammengefasst, um so ein schnelles Nachlesen und direkte Platzierung am Gerät zu bewirken.

Durch die Mieterbefragung konnte in Erfahrung gebracht werden, dass die Bewohner mit den technischen Innovationen nicht vollumfänglich zufrieden sind und diese teilweise nicht korrekt bedienen. Über die Unzufriedenheit im Bereich der Trinkwarmwasserbereitung konnten beispielsweise Mängel festgestellt werden, die über die Messdatenauswertung nicht ersichtlich waren. Von den Mietern wurde angegeben, dass die Zapftemperaturen zu gering zum Duschen sind. Die Inaugenscheinnahme der dezentralen Frischwasserstationen hat gezeigt, dass die Wärmeübertrager stark verkalkt waren, was zu einer reduzierten Wärmeübertragung und somit verringerten Erhitzung des Trinkwarmwassers geführt hat.

4.5 Wärmeverschiebung innerhalb eines Riegels

Die energetische Ertüchtigung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche wird unter Berücksichtigung der Wärmebrücken global geplant und ausgeführt. Dies bedeutet, dass trotz guter Wärmedämmung der spezifische Wärmebedarf der einzelnen Wohnungen in einem Gebäude – je nach ihrer Lage im Gebäude – nicht gleich ist. Der ermittelte Heizwärmebedarf exponiert gelegener Wohnungen variiert deutlich gegenüber geschützt liegenden Wohnungen.

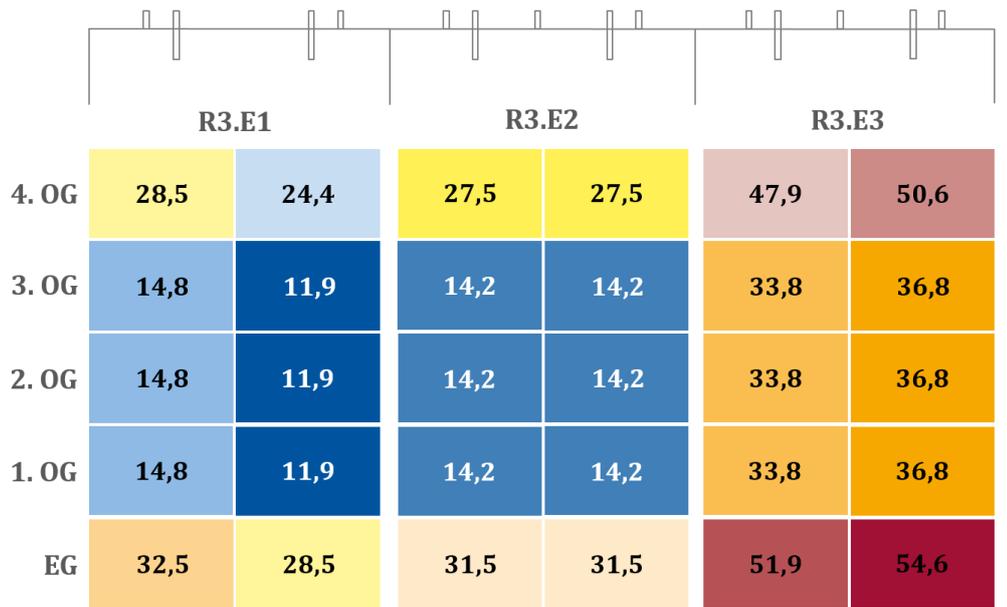


Abb. 4-35: Gegenüberstellung des berechneten Heizwärmebedarfs pro Wohneinheit in $kWh/(m^2a)$ nach DIN V 4108 für Riegel R3

Abb. 4-35 zeigt den rechnerisch ermittelten Heizwärmebedarf unter Berücksichtigung des normativen Nutzerverhaltens sowie der Lüftungswärmeverluste inkl. WRG als auch der internen und solaren Gewinne für Riegel R3. Die große Varianz zwischen den einzelnen Werten ergibt sich zum einen durch verschiedene energetische Fensterqualitäten und zum anderen durch die verbaute Lüftungstechnik mit unterschiedlicher Wärmerückgewinnung (R3.E1 + R3.E2) sowie Zwangslüftung (R3.E3). Somit sind rechnerische Abweichungen von bis zu 80 % zwischen einer Wohnung mit Ecklage (EG mit Außenecke) zu einer Wohnung an der Häusertrennwand vorhanden.

Der tatsächliche Heizwärmeverbrauch einer Wohnung wird nicht nur von der Lage einer Wohnung im Gebäude mitbestimmt, sondern auch von dem Temperaturniveau der angrenzenden Wohnungen. Die Temperaturdifferenz zwischen unterschiedlich beheizten Wohnungen ist zwar gegenüber der Differenz zur Außenluft wesentlich geringer, dafür sind jedoch die Trennflächen um ein Vielfaches größer. Hinzu kommt, dass die Wärmedämmung wohnungstrennender Bauteile wesentlich geringer ist, wenn überhaupt vorhanden, als die der äußeren Gebäudehülle. Aus diesem Grund kann der Heizwärmebedarf einer geschützt

liegenden Wohnung erheblich steigen, wenn sie von geringer beheizten Nachbarwohnungen umgeben ist.

Abb. 4-36 zeigt fünf gemessene Parameter pro Wohnung von R3 während der Heizperiode 2012/2013. In der Mitte des Feldes ist der gemessene Heizwärmeverbrauch in kWh/m² Nutzfläche aufgetragen. Oben links befindet sich die Angabe zur durchschnittlichen Wohnungstemperatur in Grad Celsius, dem gegenüber ist die durchschnittliche relative Feuchte in Prozent aufgetragen. Die Zahl unten links steht für die relative Fensteröffnungsdauer in der ganzen Wohnung in der Heizperiode 2012/13 (4 % bedeutet hierbei, dass die Fenster der Wohnung während 4 % der Heizperiode geöffnet waren). Der Wert unten rechts steht für die Luftqualität in der Wohnung, er wird als Kohlendioxidkonzentration in ppm angegeben.

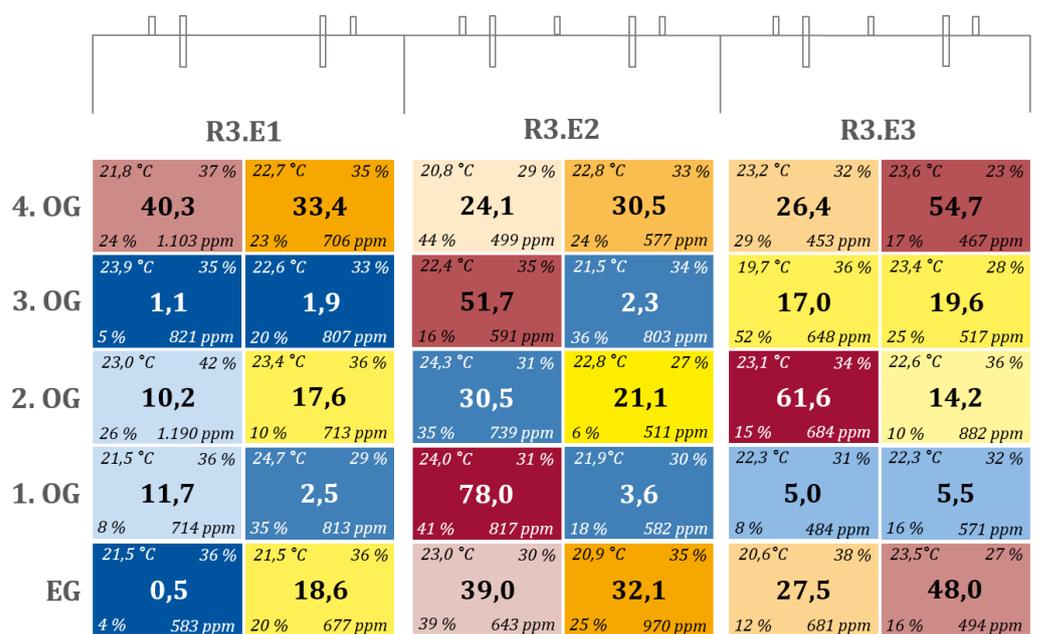


Abb. 4-36: Gegenüberstellung des Heizwärmeverbrauchs (Wert in der Mitte des Feldes) für R3 während der Heizperiode 2012/2013

Auswertungen der Heizwärmeverbräuche zeigen auf, dass der Lageeinfluss sich nicht generell im Heizwärmeverbrauch widerspiegelt. Der Energieverbrauch exponiert gelegener Wohnungen liegt teilweise sogar unter dem Durchschnitt. Offenkundig kompensiert hier das Nutzerverhalten häufig den Lageeinfluss. In Abb. 4-36 ist eine breite Streuung sämtlicher Werte ablesbar. Der Heizwärmeverbrauch schwankt beispielsweise zwischen 0,5 (R3.E1.W1) und 51,7 kWh/m² (R3.E2.W7), bei einem Unterschied von knapp einem Kelvin in der durchschnittlichen Wohnungstemperatur. Des Weiteren fällt auf, dass in der Nachbarschaft von Wohnungen mit einem hohen Verbrauch (siehe R3.E2.W3) meist nur Wohnungen mit einem mittleren oder niedrigen Verbrauch anzutreffen sind. R3.E1.W4 liegt auf der anderen Seite der Gebäudetrennwand zu R3.E2.W3 hat nahezu die gleiche Fensteröffnungshäufigkeit sowie Raumluftqualität und relative Feuchte, weist aber lediglich einen Heizwärmeverbrauch von 2,5 kWh/m² in der Heizperiode auf. Diese Wohnung hat zudem eine höhere mittlere Wohnungstemperatur als R3.E2.W3. Die relative Feuchte ist in allen

Wohnungen eher niedrig, wie in Wintermonaten häufig feststellbar. Nur einige wenige Wohnungen, beispielsweise R3.E1.W5, weisen eine erhöhte CO₂-Konzentration (> 1.000 ppm) während der Heizperiode 2012/13 auf.

Zur Sichtbarmachung der entstehenden Wärmeverschiebung wurde eine dynamische Simulation mit der Modellierungssprache Modelica© durchgeführt. Durch die Modellierung der raumumfassenden Wände, der Innenwände und der Raumlufttemperatur wird das thermische Verhalten der jeweiligen Räume der Wohnungen abgebildet. Aus den verschiedenen parametrisierten Instanzen eines Wohnraummodells setzt sich das Wohnungsmodell zusammen. Aus den Wohnungsmodellen setzt sich wiederum das Eingangs- und letztendlich Riegelmodell zusammen. Das in der Simulation hinterlegte Wettermodell basiert auf den Messdaten der lokalen Wetterstation. Für die Simulation werden einige Vereinfachungen getroffen. Die unbeheizten Bereiche werden nur indirekt berücksichtigt indem die Bauteile an der abgewandten Seite mit einer konstanten Temperatur beaufschlagt werden. Als Eingangsgröße eines jeden Raumes wird die gemessene Innenraumtemperatur berücksichtigt. Die Messdaten für die Simulationen stammen aus dem Messzyklus vom 01. Oktober 2012 bis 30. April 2013 (Heizperiode).

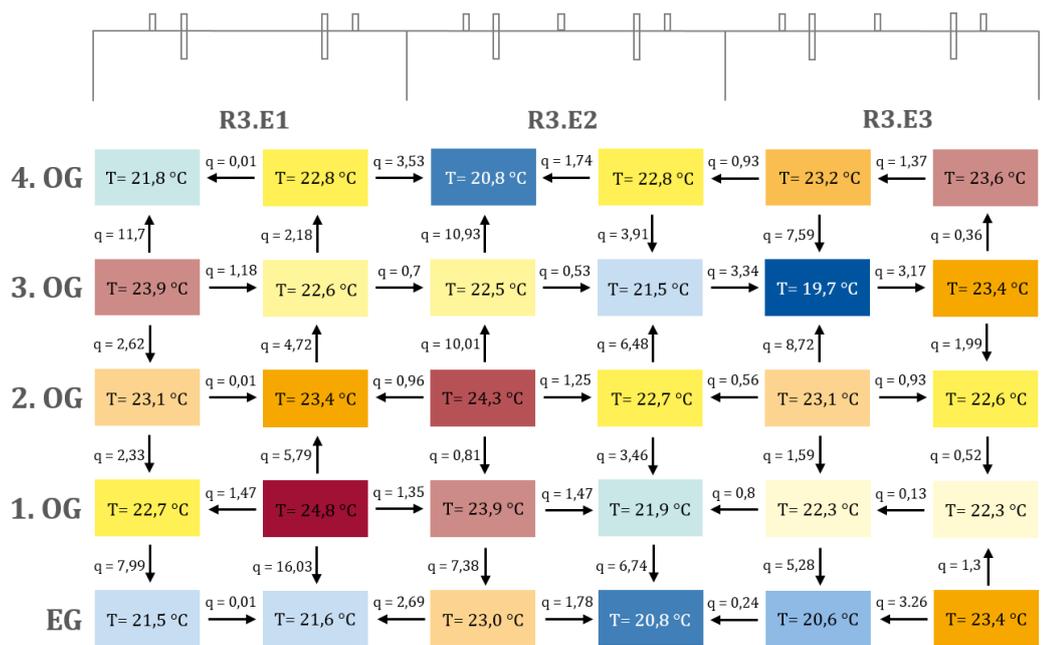


Abb. 4-37: Wärmeverschiebungen (q in kWh/m²_{WF}) zwischen den einzelnen Wohnungen von R3 während der Heizperiode 2012/13 als Ergebnis einer dynamischen Simulation

Wie bereits angeführt, kann es innerhalb der thermischen Hülle eines Gebäudes aufgrund vorhandener Temperaturunterschiede zu Wärmeverschiebungen zwischen benachbarten Wohneinheiten oder zwischen Wohnungen und dem gering temperierten Treppenraum kommen (Osterhage et al. 2016). Auf Basis der dynamischen Simulationen und den erzeugten Wohnungsmodellen wurde eine Analyse des Wärmestroms, ausgehend von den gemess-

senen Rauminnentemperaturen, durchgeführt. *Abb. 4-37* veranschaulicht die Wärmever-schiebung zwischen den einzelnen Wohnungen von R3 während der Heizperiode 2012/13. Wie bereits in *Abb. 4-36* steht das farbige Rechteck jeweils für eine Wohnung (10 Wohnun-gen pro Eingang), allerdings ist hier nicht der Heizwärmeverbrauch sondern die gemessene durchschnittliche Wohnungstemperatur während der Heizperiode aufgetragen. Die Farb-wahl klassifiziert den Status der gemessenen durchschnittlichen Wohnungstemperatur während der Heizperiode. Rot steht für hohe, gelb für mittlere und blau für geringe Woh-nungsinnentemperaturen.

Die unterschiedlichen Größen des Wärmestroms in kWh pro Quadratmeter Wohnfläche er-geben sich aus der dynamischen Simulation, wobei die Pfeile die jeweilige Richtung des Wärmestroms angeben. Aufgrund der Lage der Wohnungen und der damit einhergehenden unterschiedlichen Wärmeübertragungsfläche sind die transmittierten Wärmeströme bei annähernd gleicher Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten Wohnungen einer Etage kleiner als zwischen zwei Etagen.

Es können Wohnungen identifiziert werden (siehe *Abb. 4-37* R3.E1.W4), von denen aus-schließlich Wärme an die benachbarten Wohnungen abgegeben wird. Demgegenüber ste-hen Wohnungen, die ausschließlich Wärme von den benachbarten Wohnungen aufnehmen, beispielsweise R3.E2.W9. Die gemessenen Wohnungstemperaturen liegen über den Trep-penhaustemperaturen, somit entsteht kein Wärmegewinn durch das Treppenhaus. Die Wärmeverluste zum Treppenhaus und nach außen sind in *Abb. 4-37* der aufgrund der bes-seren Lesbarkeit nicht dargestellt, können aber *Abb. 4-38* entnommen werden.

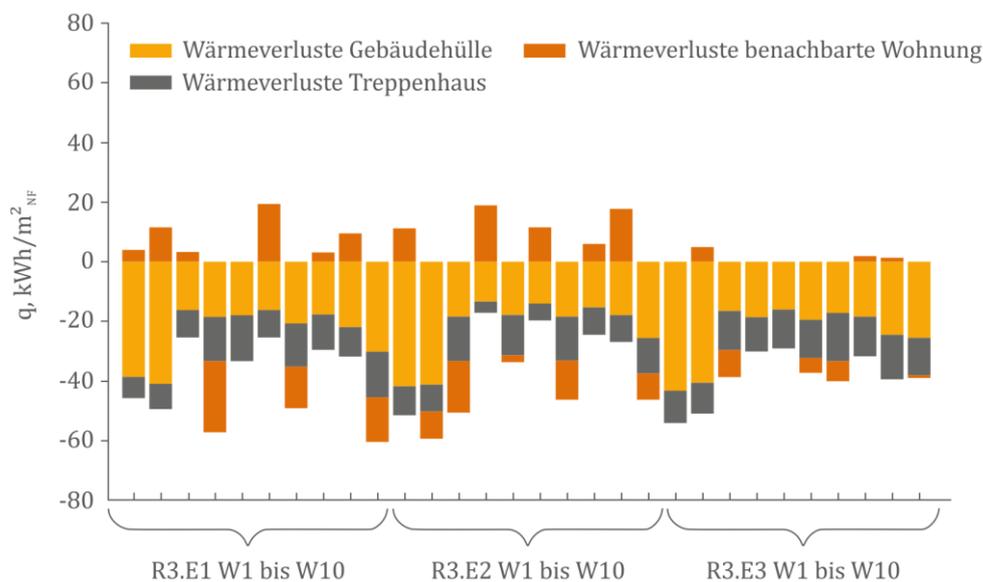


Abb. 4-38: Vergleich der Wärmetransmissionen je Wohnung bezogen auf Wohnfläche für R3 während der Heizperiode 2012/13

Auf Basis der dynamischen Simulation und der dadurch gewonnenen Ergebnisse sind in *Abb. 4-38* die Wärmeverluste pro Wohnung in kWh/m²_{Wohnfläche} über die Gebäudehülle, in das Treppenhaus oder in die benachbarte Wohnung gegenübergestellt. Auf der X-Achse

sind die einzelnen Wohnungen von R3.E1 bis R3.E3 aufgetragen. Der y-Achse sind die Werte für die Wärmemenge in kWh/m² zu entnehmen, wobei negative Werte für Verluste der jeweiligen Wohnung und positive Werte für Gewinne durch die Nachbarwohnung stehen. Die Verluste über die Außenbauteile sind in orange, die Verluste zum Treppenhaus in grau und die Verluste zur benachbarten Wohnung in dunkelocker dargestellt.

Während der Heizperiode 2012/13 werden für alle Wohnungen Wärmeverluste über die wärmeübertragende Umfassungsfläche festgestellt. Die Wärmeverluste der Erd- und Dachgeschosswohnungen sind aufgrund der Lage der Wohnungen und der größeren wärmeübertragenden Umfassungsfläche höher als bei den anderen Wohnungen. Die über die Wohnungstrennbauteile anfallende Wärmeverschiebung ist sehr unterschiedlich. Einige Wohnungen profitieren von dem Nutzerverhalten der benachbarten Wohnungen, andere haben Verluste zu verzeichnen. Je nach Lage der Wohnung ist der Wärmeverlust an das Treppenhaus ähnlich ausgeprägt wie der Verlust über die Außenwände.

Abb. 4-38 macht deutlich, dass in R3 Wohnungen vorhanden sind, deren Wärmeverluste über die wärmeübertragende Umfassungsfläche annähernd so groß sind wie die Wärmegegewinne durch die Nachbarwohnungen. Bei manchen Wohnungen kann der Anteil der Wärmeverluste durch Wärmeverschiebung zur Nachbarwohnung bis zu 50 % betragen. R3 hat eine sehr gute Dämmung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche. Daher haben die Lage und das Heizverhalten der benachbarten Wohnungen einen signifikanten Einfluss auf den Wärmeverbrauch der jeweiligen Wohnung.

Zusammenfassend lässt sich durch die detaillierte Messdatenanalyse sowie die ergänzenden dynamischen Simulationen auf Basis der Messdaten festhalten, dass die Höhe der Heizenergie und somit der Heizkosten nicht allein auf die gewählte Innenraumtemperatur zurückzuführen ist. Vielmehr spielt die Lage der Wohnung im Gebäude als auch die Dämmeigenschaften der Trennbauteile zu benachbarten Wohnungen sowie das Treppenhaus eine nicht zu vernachlässigende Rolle, denn die Lufttemperaturen in den angrenzenden Bereichen können sowohl zu Wärmeverlusten als auch -gewinnen führen.

5 Vergleich von Bedarfs- und Verbrauchswerten

5.1 Gegenüberstellung der Heizwärmeverbräuche mit den Bedarfswerten

Durch unterschiedliche klimatische Bedingungen wird der Heizwärmeverbrauch von Jahr zu Jahr beeinflusst. Daher ist es notwendig den gemessenen Verbrauch einer Witterungsbereinigung zu unterziehen. Zum einen um die unterschiedlichen Jahresverbräuche miteinander und zum anderen mit den Bedarfswerten vergleichen zu können (vgl. Kapitel 2.1.3).

In *Abb. 5-1* sind die witterungsbereinigten Verbräuche für die Jahre 2011 bis 2014 für alle Eingänge von R2 und R3 mit den jeweiligen Bedarfswerten gegenübergestellt. Die Heizwärmebedarfswerte wurden unter Berücksichtigung der installierten Lüftungstechnik berechnet; daher fallen die Bedarfswerte für R2.E1, R3.E1 und R3.E2 besonders gering aus. Aufgrund der batteriegebundenen Messtechnik in R1 liegen keine Verbrauchswerte für diesen Gesamtzeitraum vor; daher stehen im Weiteren nur R2 und R3 für die Detailanalyse zur Verfügung.

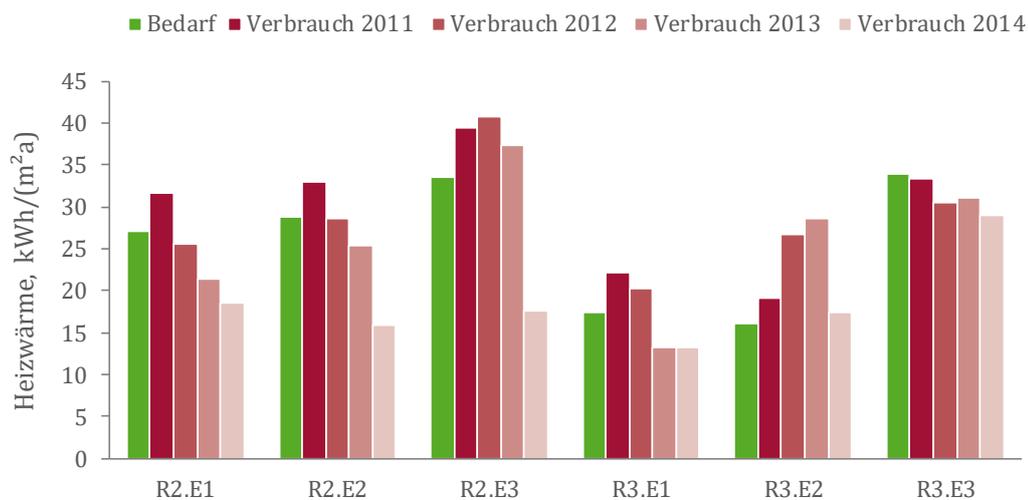


Abb. 5-1: Vergleich des witterungsbereinigten Heizwärmeverbrauchs und Heizwärmebedarfs nach DIN V 4108-6 für R2 und R3

Für das Jahr 2011 sind für alle Eingänge außer für R2.E3 und R3.E2 die höchsten Verbrauchswerte ablesbar. Dieses Jahr kann auch als Einregulierungsphase gewertet werden, denn nach der Messdatenanalyse wurden Pumpen sowie Vorlauftemperaturen etc. neu eingestellt. Für die Praxis bedeutet dies, dass nach einem Jahr eine Überprüfung der eingestellten Parameter und ggfs. eine Neueinstellung erfolgen sollte. In den Folgejahren ist für jede Sanierungsvariante, wenn auch teilweise verzögert, eine Reduzierung der Verbrauchswerte in unterschiedlicher Ausprägung festzustellen. In fast allen Sanierungsvarianten, außer R2.E3 und R3.E2, liegen die Verbrauchswerte nach zwei Jahren unter den Bedarfswerten.

In den Jahren 2012 und 2013 haben Infoabende für die Mieter zum richtigen Gebrauch der Anlagentechnik stattgefunden. Im Herbst 2013 wurde dieser Infoabend durch eine Mieterbefragung und individuelle Ansprachen ergänzt. In der darauffolgenden Zeit konnte ein Rückgang der Verbrauchswerte festgestellt werden. Der Erfolg der Mieterbetreuung ist ein Zeichen dafür, dass dieses Vorgehen bei allen Sanierungen von Bestandsgebäuden gefordert werden sollte, um somit sämtliche Potentiale der energetischen Sanierung heben zu können.

Im Jahr 2014 kann für alle Eingänge, bis auf R3.E2, der geringste Verbrauch und damit einhergehend eine Unterschreitung der Bedarfswerte abgelesen werden. Die geringste Unterschreitung der Bedarfswerte liegt für R3.E3 bei 1 % und die größte Unterschreitung für R2.E3 bei 48 % vor. Es bleibt allerdings anzumerken, dass sich die Verbrauchswerte für R3.E3 über alle Jahre nahezu konstant verhalten und bereits im ersten Jahr eine Unterschreitung der Bedarfswerte vorliegt.

5.2 Vergleich der Energiebedarfs- und -verbrauchswerte für die Trinkwarmwassererzeugung

Nach EnEV kann für Wohngebäude das Nachweisverfahren sowohl nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 als auch nach DIN V 18599 durchgeführt werden. Für die Berechnung des Trinkwarmwasserenergiebedarfs ergeben sich daher zwei unterschiedliche Bedarfswerte. Nach DIN V 4701-10 ist für die Ermittlung des Nutzenergiebedarfs für die Trinkwarmwasserbereitung ein Wert von $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf die Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV anzusetzen. Im Gegensatz dazu unterscheidet die DIN V 18599 (siehe Tabelle 4 aus (Vornorm DIN V 18599-10)) zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern. Für Mehrfamilienhäuser sind $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf die jeweilige Wohnfläche zu berücksichtigen. Im hier vorliegenden Fall ergibt sich ein zu berücksichtigender Wert von $13,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Beispielhaft für die Jahre 2011 bis 2014 stellt *Abb. 5-2* die gemessenen Verbrauchswerte für die dezentralen Trinkwarmwassersysteme von R2.E1, sowie allen Eingängen von R3, den Bedarfswerten der beiden Normen gegenüber. Die türkisfarbene Linie spiegelt den Bedarfswert nach DIN V 4701-10 und die gestrichelte Linie den Bedarfswert nach DIN V 18599 wider. Die Säulen stehen für die Summe der einzelnen in den Wohnungen gemessenen Verbrauchswerte. Aufgrund der dezentralen TWW-Systeme sind in den Verbrauchsdaten keine Verteilverluste enthalten.

Im Jahr 2011 waren noch nicht alle Wohnungen in R3.E2 und R3.E3 belegt, daher liegen hier sehr geringe Werte vor. Für R2.E1 und R3.E1 kann über die Jahre ein Rückgang des Energieverbrauchs für die Trinkwarmwassererwärmung abgelesen werden. Im Gegensatz dazu ist für die Eingänge E2 und E3 von R3 eher ein Anstieg des Verbrauchs abzulesen. Die gemessenen Verbrauchswerte für R3.E3 liegen seit 2012 im Bereich des Bedarfswertes nach DIN V 18599 mit $13,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bzw. übersteigen diesen deutlich.

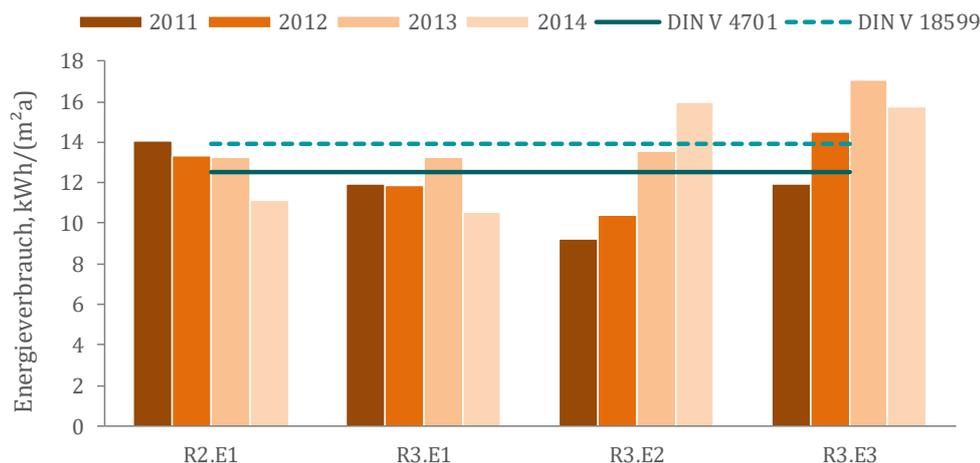


Abb. 5-2: Gegenüberstellung des Energieverbrauchs für Trinkwarmwasserbereitung von R2.E1 sowie E1 bis E3 von R3 für die Jahre 2011 bis 2014 und dem anzusetzenden Bedarf nach DIN V 4701-10 (türkis) und DIN V 18599 (gestrichelt)

Über die Jahre gemittelt ergibt sich für R2.E1 ein Wert von knapp 12,9 kWh/(m²a). Für die Eingänge von R3 ergeben sich Durchschnittswerte von knapp 11,9 kWh/(m²a) (R3.E1) bzw. 11,3 kWh/(m²a) (R3.E2) bis hin zu 14,8 kWh/(m²a) für R3.E3. Bei Betrachtung der durchschnittlichen Werte fällt auf, dass lediglich in R3.E1 sowie R3.E2 den Bedarfswert der DIN V 4701-10 nicht erreichen. Hier liegt eine mittlere Unterschreitung von 5 bzw. 2 % vor. Wohingegen R2.E1 mit seinem Durchschnittswert über vier Jahre den normativen Wert von 12,5 kWh/(m²a) mit knapp 3,5 % leicht überschreitet. R3.E3 überschreitet seit 2012 die normativen Vorgaben der DIN V 4701-10 also auch der DIN V 18599. Über alle 40 Wohnungen gemittelt ergibt sich ein jährlicher Energieverbrauch für die Trinkwarmwassererzeugung von 12,9 kWh/(m²a). Dieser Wert liegt somit im Bereich des normativen Ansatzes nach DIN V 4701-10.

5.3 Gegenüberstellung der Endenergieverbräuche und -bedarfswerte

Für die Energiebilanz eines jeden Gebäudes ist das Aufzeigen der einzelnen Energieströme notwendig. Letztendlich werden alle dem Gebäude jährlich zugeführten und abgenommenen Energiemengen gegenübergestellt. Diese rechnerische Energiebilanz führt zum rechnerischen Endenergiebedarf.

In Abb. 5-3 ist der nach DIN V 4108-6/4701-10 berechnete Endenergiebedarf mit den gemessenen, witterungsbereinigten Verbrauchsdaten gegenüber gestellt. Bei der Betrachtung der Daten muss beachtet werden, dass im Jahr 2011 noch nicht alle Mieter in allen Eingängen eingezogen waren, hinzu kommen im Jahr 2014 Ausfälle bei der Messdatenaufzeichnung.

Während die Bedarfswerte von R1 (68,1 kWh/(m²a)) und R2 (54,9 kWh/(m²a)) eher hoch ausfallen, lässt sich für R3 mit seiner installierten Anlagentechnik ein Bedarfswert von 13,8 kWh/(m²a) ablesen.

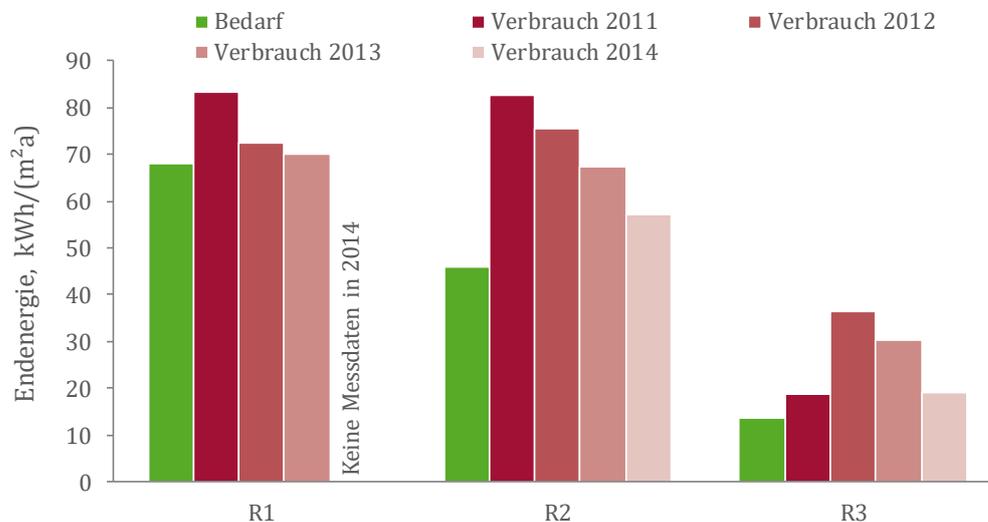


Abb. 5-3: Gegenüberstellung des Endenergiebedarfs (grün) und witterungsbereinigten Endenergieverbrauchs (Rotstufen)

Für R1 kann näherungsweise eine gute Übereinstimmung zwischen den Verbrauchswerten der Jahre 2012/2013 und dem Bedarfswerte festgestellt werden. Im Gegensatz dazu ist für R2 ist eine Überschreitung des Bedarfswertes in allen Jahren ablesbar. Im Jahr 2012 werden 75,6 kWh/(m²a) und im Jahr 2013 67,3 kWh/(m²a) verbraucht, dies führt zu einer Überschreitung des Bedarfswertes von 37 bzw. 22 %. Die Abweichung zwischen Bedarfs- und Verbrauchswert fällt in R3, aufgrund des geringen Bedarfswertes, deutlich markanter aus. Hier ist im Jahr 2012 eine Überschreitung von 165 % und im Jahr 2013 von knapp 120 % festzustellen.

5.4 Vergleich der Primärenergieverbrauchs und -bedarfswerte

Der Jahres-Primärenergiebedarf ist die Hauptanforderungsgröße der EnEV. Der Primärenergiebedarf ist diejenige fossile Energiemenge, die gewonnen werden muss, um den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes zu decken. Dazu gehört der Energiebedarf, der für die Gewinnung, die Umwandlung und den Transport des Energieträgers notwendig ist. Je mehr benötigte Endenergie durch regenerative Energien gedeckt wird, umso höher darf diese beim Energieeinsparnachweis nach EnEV sein. Der Primärenergiebedarf ist neben dem Heizwärmebedarf abhängig vom Trinkwasserwärmebedarf (normativ festgelegt bei 12,5 kWh/(m²a)) sowie der Anlagenaufwandszahl und den entsprechenden Primärenergiefaktoren.

In Abb. 5-4 ist der Primärenergiebedarf (grün) dem gemessenen, witterungsbereinigten Primärenergieverbrauch (Rotschattierungen) der Jahre 2011 bis 2014 gegenübergestellt. Der

Vollständigkeit halber sind hier alle vier Messjahre aufgetragen, obwohl nur die Jahre 2012 und 2013 verlässliche Daten liefern (siehe Kapitel 5.3). Für die hier dargestellten Berechnungen wurden die normativen Vorgaben für die Primärenergiefaktoren $f_{P, \text{Fernwärme}} = 0,7$, $f_{P, \text{Gas}} = 1,1$ und $f_{P, \text{Strom}} = 1,8$ berücksichtigt.

Der Primärenergiebedarf für R1 fällt mit $50,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ am höchsten aus, danach folgt R2 mit $42,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und R3 mit nur $24,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Bei der Gegenüberstellung mit den Verbrauchswerten wird deutlich, dass lediglich R1 den berechneten Wert knapp einhalten kann. Hier ist eine Überschreitung von lediglich 5 % feststellbar. Im Gegensatz dazu liegen die Abweichungen zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten für R2 im Bereich von 34 (2012) bis 19 % (2013) und für R3 sogar im Bereich von 165 (2012) bis 120 % (2013).

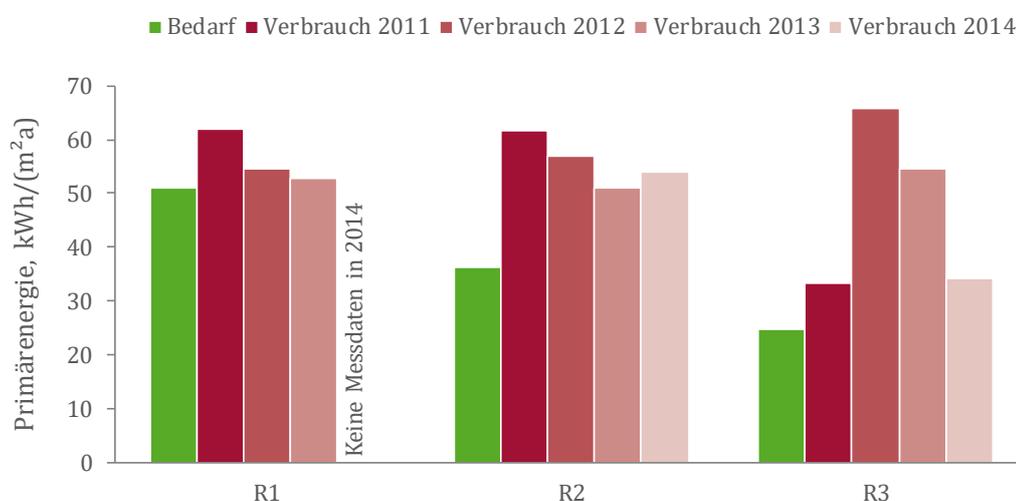


Abb. 5-4: Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs und des witterungsbereinigten Primärenergieverbrauchs

Als mögliche Gründe für die Abweichung zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten sind Fehler in der Anlagentechnik und deren Verschaltung sowie Probleme in der Nutzerakzeptanz zu nennen, die sich wiederum in einer fehlerhaften Bedienung der Anlagentechnik niederschlagen können. Beispielweise kann ein unsachgemäßes Verhalten der Bewohner beim natürlichen Lüften einen starken Effekt auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen haben.

Zusammenfassend ist anzuführen, dass in allen Sanierungsvarianten ein Rückgang des Primärenergieverbrauchs, in unterschiedlicher Ausprägung, über die Jahre ablesbar ist.

5.5 Analyse der Energieperformancelücke

Die in Kapitel 2.1.4 definierte Energieperformancelücke (EPL) gibt die prozentuale Differenz zwischen dem berechneten Heizwärmebedarf und dem witterungsbereinigten Heizwärmeverbrauch an und ist in Abb. 5-5 für das Jahr 2012 und in Abb. 5-6 für das Jahr 2013

dargestellt. Der Heizwärmeverbrauch pro Eingang ergibt sich aus der Summe der in den Wohnungen gemessenen Verbräuche.

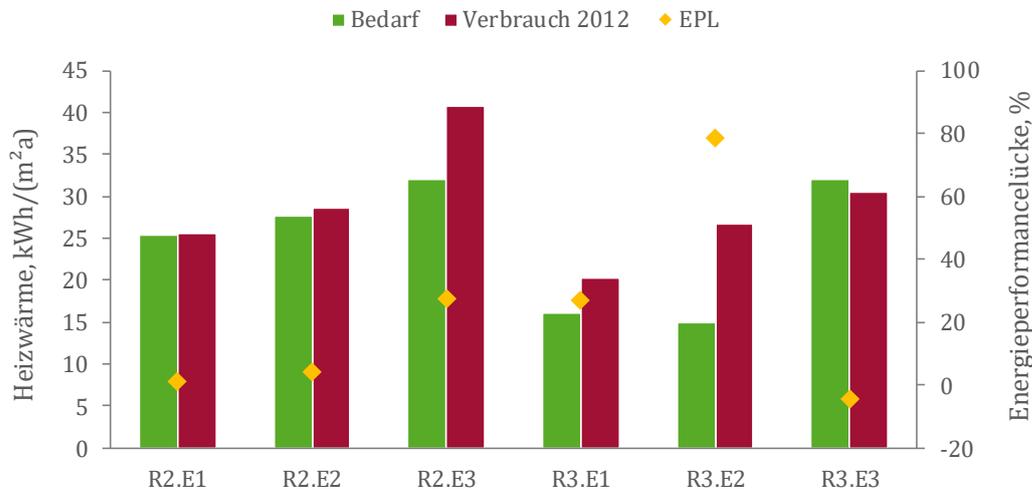


Abb. 5-5: Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (grün) und witterungsbereinigten Heizwärmeverbrauchs (rot) für das Jahr 2012 sowie Energieperformancelücke (gelbe Raute)

Je nach Sanierungsvariante schwankt die Energieperformancelücke im Jahr 2012 zwischen -10 % für R3.E3 und 67 % für R3.E2. Im Durchschnitt ergibt sich ein Wert von 15 % für die Performancelücke. Die Werte fallen für das Jahr 2013 deutlich geringer aus, der Durchschnitt liegt bei knapp 4 %. Die Werte schwanken je nach Sanierungsvariante zwischen minus 23 % (R3.E1) und 78 % (R3.E2).

Die Veränderung der Energieperformancelücke für Riegel 2 zeigt, dass das Nutzerverhalten den Energieverbrauch stark beeinflussen kann. Für Riegel 3 ist diese Entwicklung nur teilweise feststellbar. Insbesondere der Eingang 2 mit Lüftungsanlage inkl. WRG und Luftheizung schneidet vergleichsweise schlecht ab. Die Schwankungen der Energieperformancelücke fallen für Riegel 3 deutlich größer aus als für Riegel 2. Ein Grund hierfür kann das Zusammenspiel von komplexer Anlagentechnik und dem damit einhergehenden Nutzerverhalten sein.

Die Unterschiede zwischen Bedarf und Verbrauch sind kumulativ in 2013 unerheblich, im Jahr 2012 sind sie etwas größer. Bei diesen geringen Verbräuchen sind die relativen Unterschiede, die durch die Energieperformancelücke abgebildet werden, verhältnismäßig hoch. Die Differenz zwischen Bedarf und Verbrauch liegt z. B. im Jahr 2013 für Riegel 3, Eingang 2 bei 13 kWh/(m²a), was zu einer Energieperformancelücke von 79 % führt.

Eine Analyse des Lüftungsverhaltens zeigt deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Eingängen des Riegels 3. Insbesondere während der Heizperiode wird in Eingang 2 deutlich häufiger auf die Fensterlüftung zurückgegriffen. Die durchgeführte Befragung gibt Aufschluss darüber, dass die Luftheizung von den Nutzenden nicht korrekt betätigt bzw. nicht akzeptiert wird.

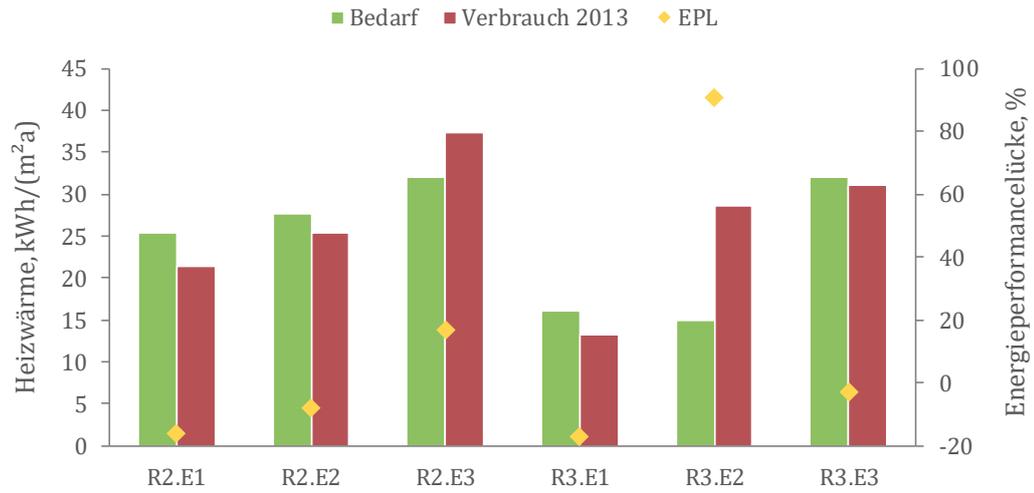


Abb. 5-6: Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (grün) und witterungsbereinigten Heizwärmeverbrauchs (rot) für das Jahr 2013 sowie Energieperformancelücke (gelbe Raute)

6 Auswirkungen individueller Parameter auf die Energiebedarfsberechnung

6.1 Direkte und indirekte Nutzereingriffsmöglichkeiten

Abweichungen zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten in energieeffizient sanierten Wohngebäuden lassen sich sowohl auf anlagentechnische Unzulänglichkeiten bzw. indirekte Nutzereinflüsse als auch auf das direkte Nutzerverhalten zurückführen (siehe Kapitel 4.3 sowie *Abb. 6-1*).

Direkter Nutzereingriff				
Gebäude / Raum			Warmwasser	
Temperatur-sollwert	Fensteröffnungs-verhalten	Interne + solare Gewinne	TWW-Temperatur	TWW-Anforderung
Komfortanspruch Teilbeheizung Wärmeverschiebung	Lüftungsverhalten Nutzung Lüftungstechnik	Ausstattung Lebensgewohnheiten Verschattung	Temperaturniveau Zapfprofil	Häufigkeit Ausstattung
Ohne/ Indirekter Nutzereingriff				
Gebäude		Anlagentechnik		
Transmissions-wärme - extern -	Transmissions-wärme - intern -	Heizungs-Effizienz	Lüftung	Trinkwarm-wasser
Übergangswiderstände Wärmebrücken Wärmeleitfähigkeit	Wärmeverschiebung Temperaturkorrektur-faktoren	Übergabe-, Verteil-, Speicherverluste Hilfsenergiebedarf	Wärmerück-gewinnung Leckagen	Zirkulation(sverluste) Speicherverluste

Abb. 6-1: Gegenüberstellung der direkten und indirekten Nutzereingriffsmöglichkeiten

Der Nutzer bestimmt durch seine Anforderungen an die thermische Behaglichkeit und Luftqualität die Raumtemperatur sowie den Luftwechsel und damit einhergehend den Heizwärmeverbrauch. Eingriffe in die Anlagentechnik haben Auswirkungen auf die Effizienz der Komponenten sowie die benötigte Hilfsenergie und somit auf den End- und Primärenergieverbrauch. Aufgrund des heute geforderten Wärmeschutzniveaus steigt der Anteil des Energieverbrauchs für die Trinkwarmwassererzeugung. Dieser ergibt sich durch den nutzerabhängigen Warmwasserbedarf und die jeweilige Geräteausstattung.

Letztendlich lassen sich Rückschlüsse aus dem Nutzerverhalten hinsichtlich möglicher Kompensations- (Änderung der normativen Parameter bei der Berechnung) oder Einbeziehungsmöglichkeiten (Nutzermotivation) ziehen. Daraus können Empfehlungen für die energetische Ertüchtigung sowie Nutzungsempfehlungen abgeleitet werden. Dabei muss zwischen den baukonstruktiven (z. B. Luftdichtheit), den anlagentechnischen (z. B. Bedienelemente), sowie den politischen Möglichkeiten (z. B. Energiepreisssteigerung) unterschieden werden.

Auf Basis der Messdatenauswertung werden in den kommenden Kapiteln 6.2 bis 6.5 die nutzerspezifischen Parameter wie Innenraumtemperatur, Lüftungsverhalten, interne Gewinne und Trinkwarmwasserkonsum analysiert.

6.2 Analyse der gemessenen Innenraumtemperaturen

Im Rahmen der messtechnischen Analyse werden die Raumtemperaturen aller Wohnungen im Jahr 2012 sowie 2013 ausgewertet. Ziel ist die Quantifizierung der durchschnittlichen Innentemperatur in den einzelnen Räumen als auch in der Wohnung unter Berücksichtigung der jeweiligen Sanierungsvariante.

In einem ersten Schritt werden die vorliegenden Daten einer Plausibilitätskontrolle unterzogen und entsprechende Ausreißer aus der Analyse ausgeschlossen. Die Durchführung der Analysen erfolgt auf Basis der stündlichen Messwerte (Außentemperatur, Energieverbrauch pro Wohnung, Temperatur pro Raum pro Wohnung). Bei den hier ausgewerteten und dargestellten Daten handelt es sich um die korrigierten Temperaturwerte.

Für alle Sanierungsvarianten lässt sich sowohl für die einzelnen Räume als auch Wohnungen festhalten, dass nur eine geringe Korrelation zwischen der mittleren Innen- und Außentemperatur besteht. In *Abb. 6-2* sind beispielhaft die mittleren Wohnungsinnentemperaturen für die Sanierungsvarianten von R2 den mittleren Außentemperaturen im Februar 2012 gegenübergestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass über das Temperaturspektrum vom -16 bis 16 °C die mittleren Wohnungsinnentemperaturen annähernd in gleichem Maß schwanken. Allerdings ist ein leichter Anstieg der mittleren Wohnungsinnentemperatur in Relation mit der steigenden Außentemperatur zu verzeichnen.

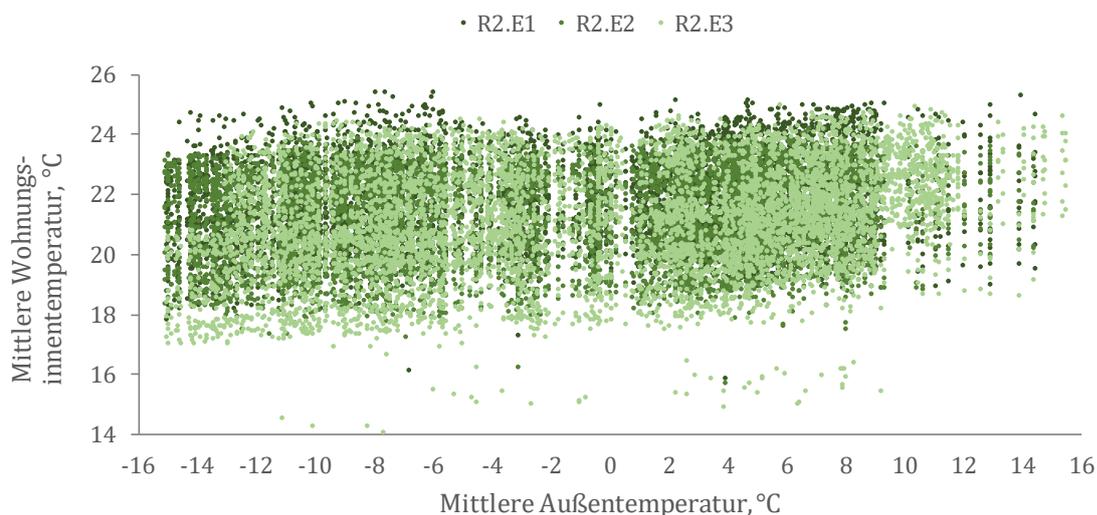


Abb. 6-2: Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen und Außentemperaturen im Februar 2012 für die Sanierungsvarianten von R2

Zur weiteren Analyse der auftretenden Innenraumtemperaturen werden im Folgenden die Räume Bad, Küche und Wohnen genauer analysiert und letztendlich eine Wohnungs- bzw.

Eingangsbetrachtung durchgeführt. Da die Nutzung der Räume Kind und Schlafen in den einzelnen Wohnungen nicht genau zugeordnet werden kann, gehen diese Daten zwar in die Bilanzierung der Wohnungsinnentemperatur ein; eine genaue Analyse wird jedoch nicht vorgenommen.

6.2.1 Temperaturanalyse für das Badezimmer

Für alle Badezimmer in den Wohnungen der sechs Sanierungsvarianten lässt sich eine deutliche Varianz der mittleren Innenraumtemperaturen während der Heizperiode 2012 ablesen.

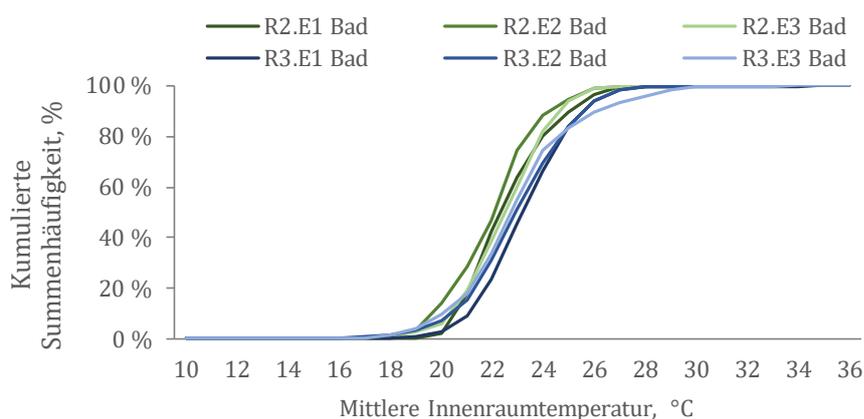


Abb. 6-3: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen im Bad der einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Eine detailliertere Aussage zu den Temperaturverhältnissen im Badezimmer, betrachtet für die jeweilige Sanierungsvariante, gibt die in Abb. 6-3 dargestellte kumulierte Summenhäufigkeit der Raumlufttemperatur. Es wird deutlich, dass für alle Badezimmer eine höhere Innenraumtemperatur, als die nach EnEV angesetzten 19 bzw. 20 °C, vorhanden ist. Die Variationsbreite liegt bei einer Summenhäufigkeit von 50 % zwischen 22 °C für R2.E2 und 23 °C für R3.E1. Die 100 %-Marke wird je nach Eingang zwischen 27 und 30 °C erreicht.

Um die Varianz der auftretenden gemessenen Daten deutlich zu machen, ist in Abb. 6-4 die statistische Verteilung der gemessenen Innenraumtemperaturen während der Heizperiode 2012 für die einzelnen Sanierungsvarianten gegenübergestellt. Die Spannweite reicht von knapp 12 °C bis hin zu einem absoluten Maximum von annähernd 30 °C, wobei diese hohen Temperaturen eher auf ein Dusch-/ oder Badeereignis schließen lassen. Der Median der mittleren Innenraumtemperatur variiert zwischen den einzelnen Badezimmern eines Eingangs um maximal 4 K und liegt zwischen 22,2 und 22,9 °C. Lediglich für R3.E2 ist eine Abweichung nach oben mit einem Wert von 23,6 °C ablesbar. Über alle 60 Wohnungen betrachtet lässt sich lediglich für R2.E2.W6 und R3.E3.W7 ein Medianwert unterhalb von 20 °C feststellen. Die Details zu den wohnungsbezogenen Daten können dem Anhang entnommen werden.

Im Gegensatz zur Energiebedarfsberechnung nach EnEV wird bei der Auslegung der Heizlast für das Badezimmer eine Temperatur von 24 °C angesetzt. Die gemessenen Werte spiegeln dementsprechend das angesetzte Auslegungsverhalten nach DIN V 12831 wider.

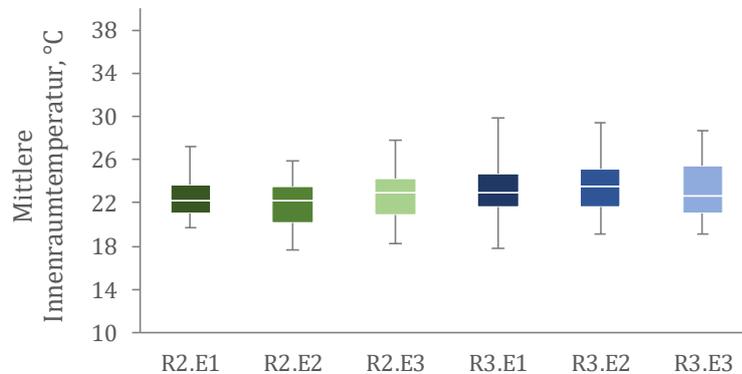


Abb. 6-4: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante im Bad während der Heizperiode 2012

Ergänzende Auswertungen zur Heizperiode 2012 können Abb. 13-1 und Informationen zur Heizperiode 2013 dem Anhang Abb. 13-5 bis Abb. 13-7 entnommen werden.

6.2.2 Temperaturanalyse für die Küche

Für die Messdaten der Küchen ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Badezimmer, allerdings liegen für eine Wohnung von R2.E3 keine Messdaten vor. Die Varianz schwankt zwischen knapp 12 °C und 30 °C, wobei nicht explizit darauf geschlossen werden kann, dass die hohen Temperaturen durch einen Heizvorgang und nicht durch das Kochen erzeugt wurden.

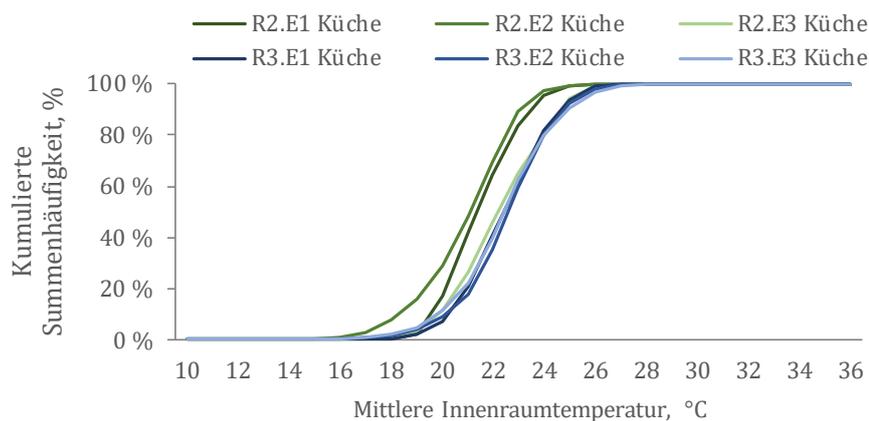


Abb. 6-5: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen in der Küche der einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Die Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperaturen ist Abb. 6-5 zu entnehmen. Im Gegensatz zu den Werten im Badezimmer ist hier eine deutlich ausgeprägtere Varianz

zwischen den einzelnen Sanierungsvarianten erkennbar. Während der 50 %-Wert für R2.E2 bei knapp 21 °C liegt, kann für R3.E3 ein Wert von 22,7 °C abgelesen werden. Die 100 %-Marke liegt mit Werten zwischen 26 und 27 °C ebenfalls unter den Werten des Badezimmers.

Abb. 6-6 stellt noch einmal die Varianz der gemessenen Innenraumtemperaturen in den Küchen der einzelnen Sanierungsvarianten gegenüber. Auch hier ist feststellbar, dass sich die Quartile ähnlich verhalten und lediglich einzelne Ausreiser nach oben und unten vorhanden sind.

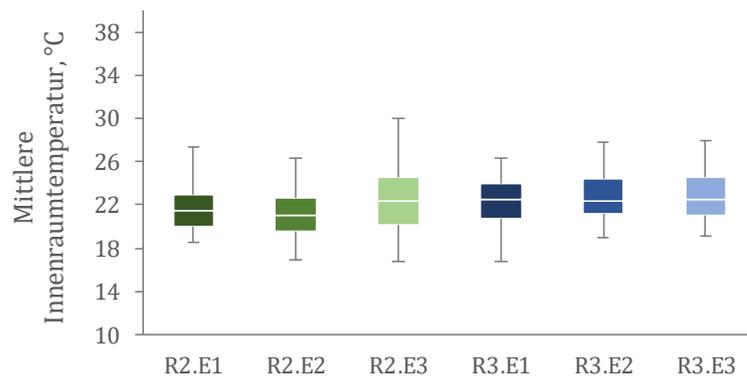


Abb. 6-6: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante in der Küche während der Heizperiode 2012

Die Medianwerte der einzelnen Innenraumtemperaturen in den Küchen der einzelnen Riegel variieren deutlicher innerhalb einer Sanierungsvariante, als dies im Bereich der Badezimmer der Fall ist. Beispielweise schwankt die Mediantemperatur in den Küchen von R2.E2 zwischen 17,6 und 23,1 °C. Die geringste Mediantemperatur lässt sich mit 21,1 °C für R2.E2 und die höchste Mediantemperatur für R3.E1 sowie R3.E3 mit 22,5 °C ablesen. Ergänzende Informationen zu den wohnungsweisen Kücheninnentemperaturen können Abb. 13-2 sowie für die Heizperiode 2013 Abb. 13-8 bis Abb. 13-10 im Anhang entnommen werden.

6.2.3 Temperaturanalyse für das Wohnzimmer

Die Messdaten für das Wohnzimmer zeigen ein ähnliches Bild wie die Daten für das Badezimmer und die Küche. Bei einer Summenhäufigkeit von 50 % kann für R2.E1 eine mittlere Wohnzimmerinnentemperatur von 21 °C abgelesen werden. Für R3.E3 hingegen beläuft sich die Temperatur zum gleichen Zeitpunkt auf 23 °C. Dementsprechend variieren auch die Werte für die Summenhäufigkeit von 100 %. Während für R2.E2 und R2.E3 Temperaturen im Bereich von 25 - 26 °C vorzufinden sind, ergibt sich bspw. für R3.E3 ein 100 %-Wert von knapp 30 °C. Weitere Informationen zu den jeweiligen Wohnzimmern der einzelnen Wohnungen im Jahr 2012 und 2013 können dem Anhang Abb. 13-3 sowie Abb. 13-11 ff. entnommen werden.

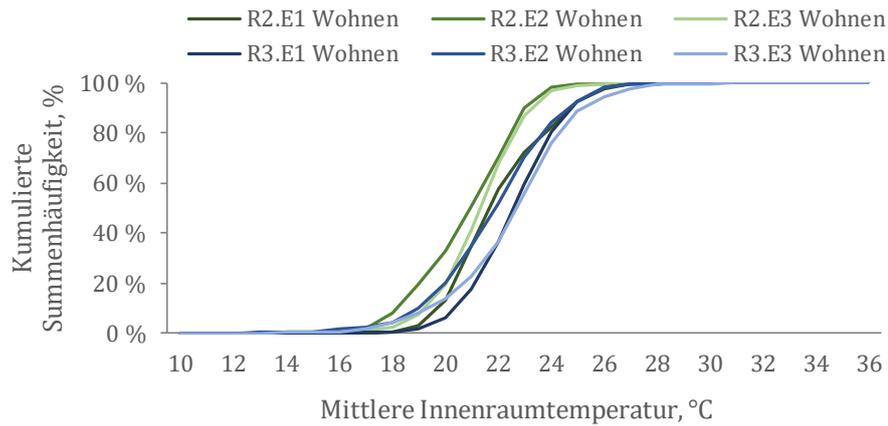


Abb. 6-7: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen im Wohnzimmer der einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Abb. 6-8 verdeutlicht das gewonnene Bild der mittleren Wohnzimmerinnentemperaturen noch einmal. Innerhalb der einzelnen Wohnzimmer in den Sanierungsvarianten sind maximale Schwankungen zwischen den Quartilen von 2,5 K feststellbar. Dies führt wiederum bei der Zusammenführung der einzelnen Wohnungsdaten zu ausgewogenen Boxplots mit einer maximalen Ausdehnung von 4,2 K. Der Median schwankt zwischen 21 °C für R2.E2 und 23,2 °C in R3.E3.

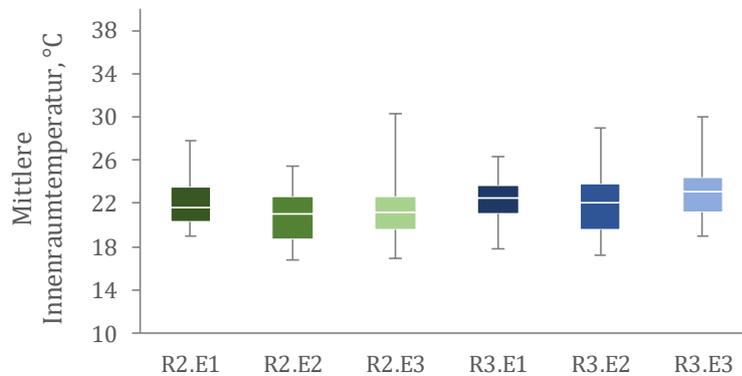


Abb. 6-8: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante im Wohnzimmer während der Heizperiode 2012

6.2.4 Temperaturanalyse für die Sanierungsvarianten

Nachdem alle Räume der Wohnungen pro Sanierungsvariante separat betrachtet wurden, werden im Folgenden die Daten für die einzelnen Eingänge zusammengeführt und ausgewertet.

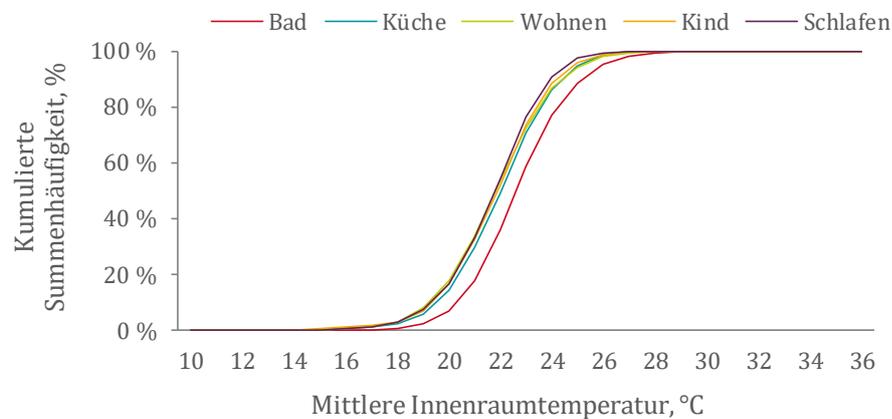


Abb. 6-9: Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperaturen über alle Sanierungsvarianten je Raumnutzung während der Heizperiode 2012

In Abb. 6-9 ist die Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperaturen für die einzelnen Räume über alle Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012 aufgetragen. Die Summenhäufigkeit der Temperaturen für die Räume Küche, Wohnen, Kind und Schlafen verläuft nahezu gleich. Die Werte für das Badezimmer hingegen sind um ein Kelvin nach rechts verschoben, somit ergibt sich ein Wert von 23 °C bei 50 %. Während der 100 %-Wert für die übrigen Räume bei knapp 29 °C liegt, können im Badezimmer Werte im Bereich von über 31 °C abgelesen werden. Hierbei handelt es sich zwar um kurzfristige Ereignisse, macht aber zudem deutlich, welche Wünsche vom Nutzer ausgehen. Zwischen den einzelnen Räumen und den darin enthaltenen Innenraumtemperaturen kann eine Standardabweichung von 0,9 K während der Heizperiode 2012 festgestellt werden. Die Verteilung der Werte für die einzelnen Raumnutzungen ändert sich auch in der Heizperiode 2013 nicht.

Im Vergleich zu anderen Studien, bspw. von Künzel (Künzel 1979), können hier keine größeren Temperaturabweichungen zwischen den einzelnen Räumen festgestellt werden. Die Messdatenanalyse zeigt, dass die Räume gleichmäßig über das ganze Jahr, mehr oder weniger stark, beheizt werden. Im Gegensatz zu der Situation vor der Sanierung kann hier keine Teilbeheizung der Wohnungen festgestellt werden.

Zur Ermittlung der mittleren Wohnungsinnentemperatur werden die jeweiligen Innentemperaturen in den einzelnen Räumen flächengewichtet zusammengeführt. Ergänzend wird davon ausgegangen, dass die Zimmertüren nicht durchgehend verschlossen sind und sich somit eine gleichmäßige Verteilung der Temperaturen in der Wohnung einstellt.

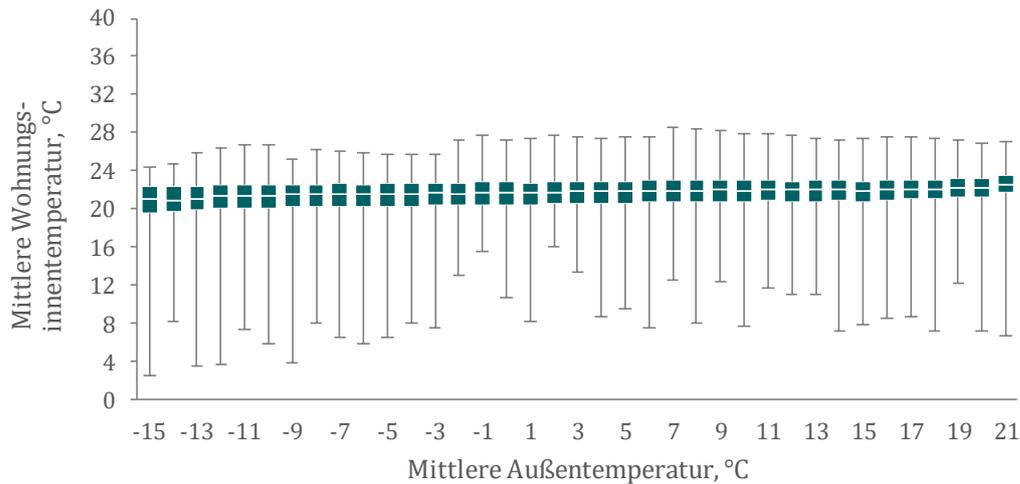


Abb. 6-10: Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen bei gemessener Außentemperatur während der Heizperiode 2012

In Abb. 6-10 sind die gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen bei auftretenden mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012 gegenübergestellt. Für die Quartile und Mediane ergibt sich über alle Außentemperaturen ein sehr gleichförmiges Bild. Zwischen dem oberen und unteren Quartil ist eine maximale Abweichung von 3 K feststellbar. Das untere Quartil schwankt in einem Temperaturbereich von 19,6 bis 21,7 °C und das obere Quartil zwischen 22,4 und 23,5 °C. Der Median ergibt sich entsprechend in einem Temperaturband von 20,9 bis 22,6 °C. Über alle Außentemperaturen machen sich Ausreißer für die mittlere Wohnungsinnentemperatur in einem Temperaturbereich von unter 10 °C, bspw. durch Lüften, bemerkbar.

Über die gesamte Heizperiode 2012 und alle Außentemperaturen betrachtet, ergibt sich kumuliert über alle Sanierungsvarianten eine mittlere Wohnungsinnentemperatur von knapp 22 °C. Dieser Wert verändert sich auch in der darauffolgenden Heizperiode 2013 nicht (siehe Abb. 13-14 bis Abb. 13-18). Für die Heizperiode 2013 sind allerdings deutlich ausgeprägtere Ausreißer nach oben (Maxima) für alle Außentemperaturen feststellbar.

Ergänzend zur Varianz der mittleren Wohnungsinnentemperaturen ist in Abb. 6-11 die Anzahl der auftretenden mittleren Wohnungsinnentemperaturen bei entsprechenden Außentemperaturen aufgetragen. Es zeigt sich, dass die nach EnEV anzusetzende Temperatur, 19 bzw. 20 °C, im Mittelfeld der Häufung liegt. Eine gemessene Innentemperatur von 20 °C kommt dabei doppelt so häufig vor, als 19 °C. Die größte Anzahl an Werten kann für den Temperaturbereich von 21 bis 24 °C abgelesen werden, wobei der Wert von 23 °C mit einer Anzahl von über 46.000 Daten über alle Außentemperaturen das Maximum bildet. Temperaturen unterhalb von 19 °C stellen mit einer Gesamtanzahl von ca. 6.100 Werten nur zwei Prozent der gemessenen Werte dar. Für die Heizperiode 2013, siehe Abb. 13-16, ergibt sich ein nahezu identisches Bild, auch wenn sich die Kurven entsprechend der Außentemperaturen verschieben.

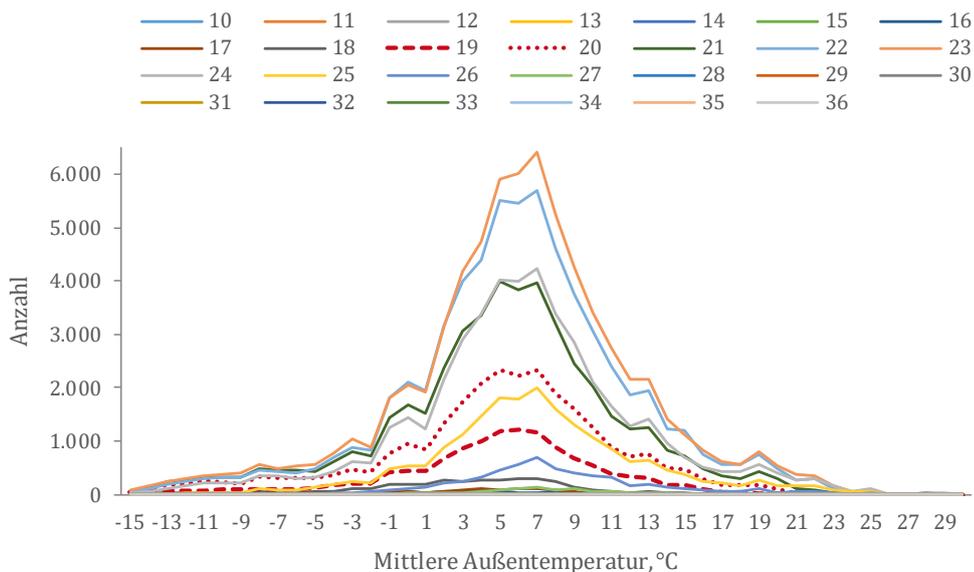


Abb. 6-11: Anzahl der vorhandenen Wohnungsinnentemperaturen bei mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012

Zusammengefasst für die einzelnen Sanierungsvarianten ergibt sich für die Spreizung der Wohnungsinnentemperaturen das in Abb. 6-12 dargestellte Bild. Die Schwankungsbreite zwischen dem unteren und oberen Quartil beläuft sich auf 5 K. Der geringste Wert kann für R2.E2 mit 18,7 °C und der höchste Wert von 25,5 °C für R3.E3 abgelesen werden. Der Median schwankt entsprechend zwischen 21,5 °C (R2.E1) und 22,7 °C (R3.E3). Die vorgefundenen Schwankungen lassen sich zum einen durch den individuellen Nutzereinfluss und zum anderen durch die unterschiedlich installierten Heizsysteme erklären. Über alle Sanierungsvarianten betrachtet ergibt sich somit eine mittlere Wohnungsinnentemperatur von knapp 22 °C. Dieses Ergebnis verändert sich auch während der Heizperiode 2013 nicht (siehe Anhang Abb. 13-14).

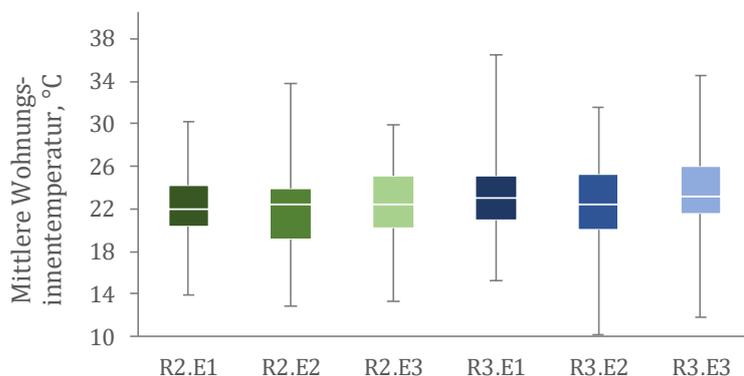


Abb. 6-12: Boxplot der auftretenden Wohnungsinnenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

6.2.5 Auswirkungen der gemessenen Innenraumtemperaturen auf die Bedarfsberechnungen nach EnEV

Die detaillierte Analyse der gemessenen Innenraumtemperaturen in den einzelnen Wohnungen hat gezeigt, dass die normativen Vorgabewerte nach EnEV von den Nutzern nicht eingehalten, sondern entsprechend höhere Innenraumtemperaturen gewünscht und eingestellt werden. Aktuelle Untersuchungen (Dall'O' et al. 2012) zeigen auf, dass der Dämmstandard der Neubauten, aber auch von sanierten Altbauten, dem Nutzer suggeriert, dass das erhöhte Temperaturniveau fast keinen Einfluss auf den Energieverbrauch hat, da praktisch keine Energie über die wärmeübertragende Umfassungsfläche verloren gehen kann. In *Abb. 6-13* ist der relative Heizwärmemehrbedarf für die einzelnen Sanierungsvarianten über das Spektrum der gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen aufgetragen. Es zeigt sich deutlich, dass bereits eine Steigerung der mittleren Wohnungstemperatur um 1 K eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs von ca. 16 % verursachen kann.

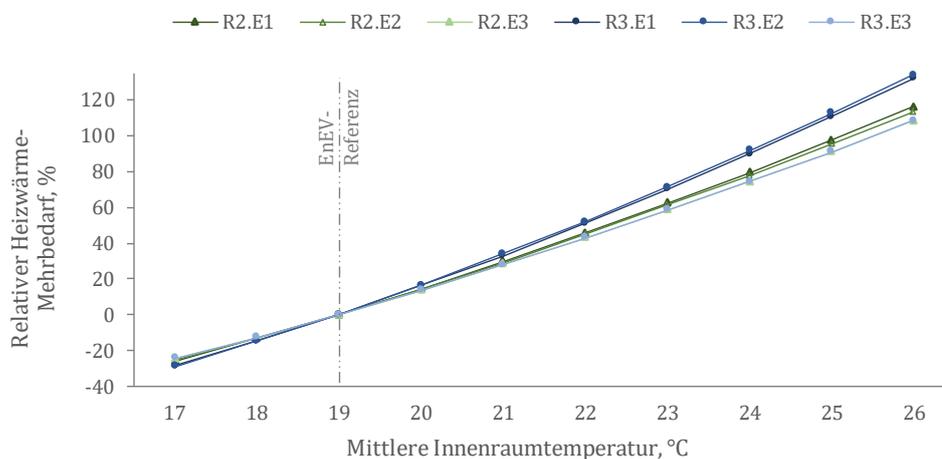


Abb. 6-13: Gegenüberstellung des relativen Heizwärme-Mehrverbrauchs bei sich ändernden Innenraumtemperaturen

Der absolute Mehrbedarf wird zwar mit zunehmender energetischer Gebäudequalität immer kleiner, der relative Einfluss des Nutzers, respektive sein Komfortempfinden, nehmen dagegen deutlich zu. Auf Basis der ermittelten Wohnungsinnentemperaturen von 22 °C ergibt sich ein theoretischer Heizwärmemehrbedarf von bis zu 50 % (bspw. für R3.E1) je nach Sanierungsvariante.

Für die Gegenüberstellung mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten wurde die EnEV-Berechnung ergänzend mit den jeweils für die einzelnen Sanierungsvarianten ermittelten Mediantemperaturen für die Jahre 2012 und 2103 berechnet. Das Ergebnis ist *Abb. 6-14* zu entnehmen. Unter Zugrundelegung der gemessenen Wohnungsinnentemperaturen kann lediglich für R3.E2 eine Übereinstimmung zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten festgestellt werden.

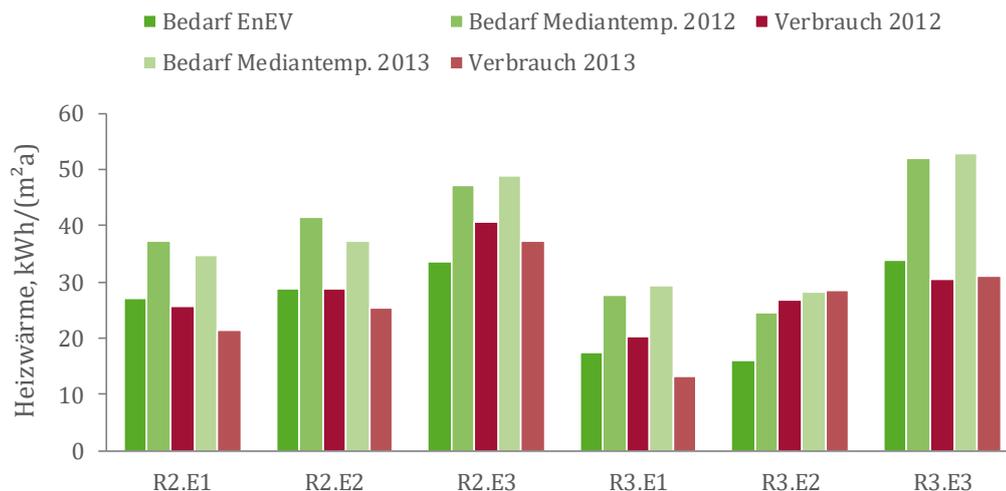


Abb. 6-14: Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (Grüntöne) nach EnEV, unter Berücksichtigung der Mediantemperatur sowie der witterungsbereinigten Verbrauchswerte (Rottöne)

Während der Heizwärmebedarf nach EnEV den Verbrauch von R3.E2 deutlich unterschätzt, ergeben sich unter Verwendung der gemessenen Wohnungstemperaturen lediglich Abweichungen kleiner 10 %. Für alle anderen Sanierungsvarianten wird unter Annahme der mittleren Wohnungstemperatur der Heizwärmebedarf deutlich überschätzt. Dies lässt darauf schließen, dass zur Erreichung der gewünschten Innenraumtemperaturen andere Parameter verantwortlich sind, beispielsweise die internen Gewinne durch Personen und Geräte.

6.3 Untersuchung des Lüftungsverhaltens

Neben den klimatischen Randbedingungen, den Wohnungstemperaturen und den bauphysikalischen Gegebenheiten eines Gebäudes beeinflusst das Lüftungsverhalten der Nutzer maßgeblich den Heizwärmeverbrauch. Für die Bedarfsberechnungen nach EnEV wird ein normativer Wert vorgegeben, doch in der Realität wird der Luftwechsel individuell vom Nutzer so gewählt, dass ein Raumklima geschaffen wird, das den Lebensvorgängen des gesunden menschlichen Körpers, angepasst ist.

6.3.1 Analyse des Fensteröffnungsverhaltens

Zur Bestimmung des Lüftungsverhaltens der Nutzer stehen für jedes öffnbare Fenster Messdaten pro Wohnung zur Verfügung. Genauere Aussagen über den Grad der Fensteröffnung - gekippt oder vollständig geöffnet - ist nur durch ergänzende Annahmen möglich. Erfahrungsgemäß hängt das Fensteröffnungsverhalten von unterschiedlichen Parametern wie der Außentemperatur, Tages- sowie Jahreszeit als auch Wohnungsbelegung und ggfs. einer maschinellen Lüftungsanlage ab.

6.3.1.1 Fensteröffnungsverhalten im Badezimmer

In *Abb. 6-15* ist die Dauer einer Fensteröffnung den mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012 für alle Sanierungsvarianten gegenübergestellt. Da es sich bei 2012 um ein eher kühleres Jahr handelt, sind hier entsprechend mittlere Außentemperaturen im Bereich von -15 °C vorzufinden. Die am häufigsten vorkommenden Außentemperaturen liegen allerdings in einem Bereich vom 0 bis 10 °C . Die detaillierte Analyse der monatlichen wohnungsweisen Messdaten zeigt, dass die Außentemperatur in einem gewissen Grad für die Fensteröffnungsdauer ausschlaggebend ist. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Jahreszeiten - Frühjahr und Herbst - ist dabei nicht zu verzeichnen. Diese Aussage bestätigt auch *Abb. 6-15*. Während Außentemperaturen kleiner 0 °C vorherrschen, können eher kurze Öffnungsdauern von bis zu 20 Minuten verzeichnet werden. Im Bereich von Außentemperaturen größer 0 °C liegen die Öffnungsdauern in einem Bereich von bis zu zwei Stunden, wobei eine deutliche Häufung der Fensteröffnungsdauer von bis zu einer Stunde feststellbar ist. Der Median der Öffnungsdauer variiert deutlich zwischen den einzelnen Wohnungen als auch Eingängen. Für die Heizperiode 2012 kann im Frühjahr der geringste Medianwert über alle Bäder von R3.E3 als auch der höchste Medianwert für sämtliche Bäder von R3.E2 abgelesen werden.

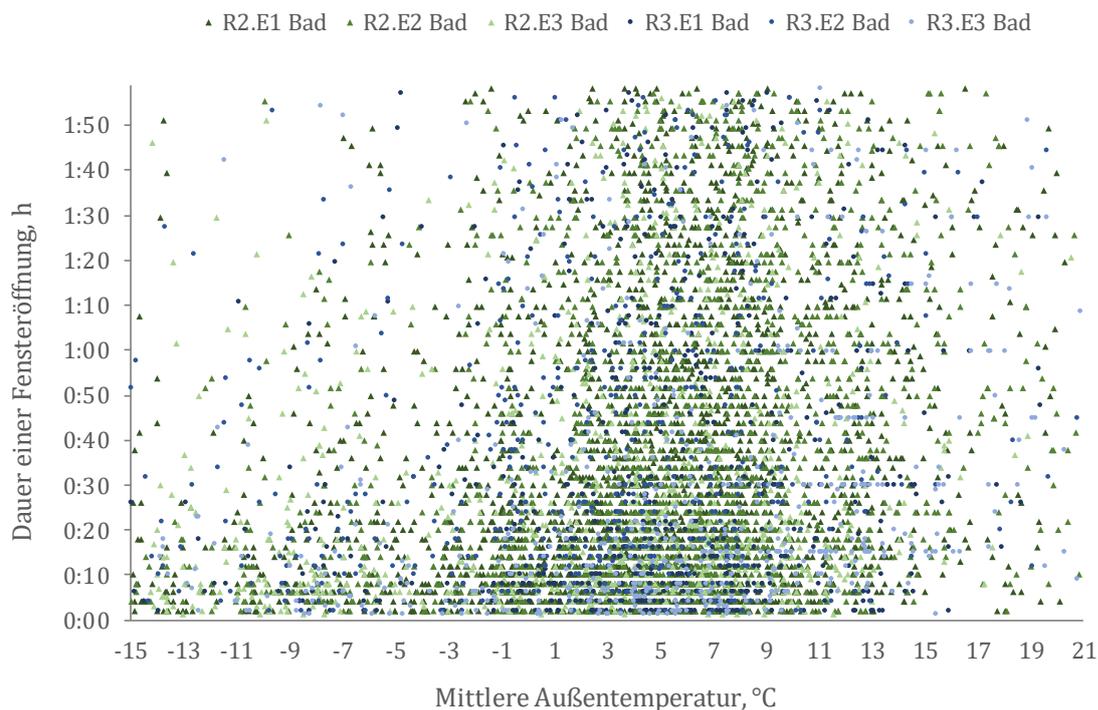


Abb. 6-15: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern im Badezimmer für alle Sanierungsvarianten über die mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012

Neben der Aussage über die Dauer einer Fensteröffnung ist es zudem von Interesse, zu welchen Tageszeiten das Fenster geöffnet wird. In *Abb. 6-16* ist kumuliert über jeweils zehn Bäder einer Sanierungsvariante die Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge während einer bestimmten Tageszeit dargestellt.

Während der Nachstunden, 24:00 bis 04:00 Uhr, sind nur einzelne Fensteröffnungsvorgänge ablesbar. In den Morgenstunden ab 6 Uhr steigt die Fensteröffnungshäufigkeit deutlich an. Über den Tag reduziert sich die Öffnungshäufigkeit wieder ein wenig, um in den Abendstunden ab 19 Uhr wieder anzusteigen. Eine Veränderung des Fensteröffnungsverhaltens zwischen Werktagen und Wochenende ist nur in geringem Maße erkennbar, und schlägt sich lediglich in einer Verschiebung der Uhrzeit am Morgen nieder.

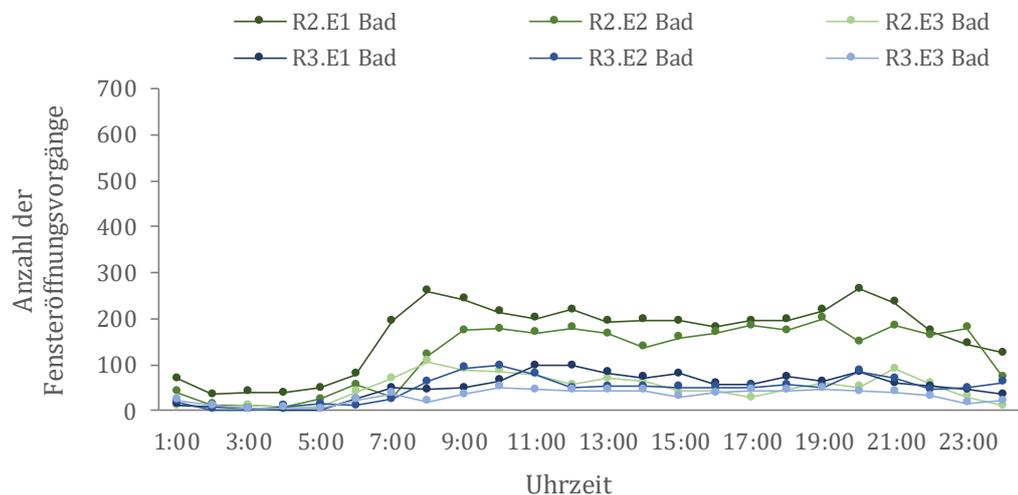


Abb. 6-16: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge jeder Sanierungsvariante für jeweils zehn Bäder während der Heizperiode 2012

In Abb. 6-17 ist der Anteil der Fensteröffnungsdauer an der Heizperiode (5.112 Stunden) für jede Sanierungsvariante (10 Bäder) gegenübergestellt. Zwischen den einzelnen Eingängen sind deutliche Unterschiede in Bezug auf das Öffnungsverhalten bzw. -dauer erkennbar. Während sich die Bewohner von R2.E3 nahezu identisch verhalten – kleinste Box und gering ausgeprägte Ausreißer – und dabei die Fenster nur zu einem geringen Prozentsatz von knapp 3 % im Median öffnen, kann bspw. für R3.E2 ein deutlich anderes Lüftungsverhalten abgelesen werden.

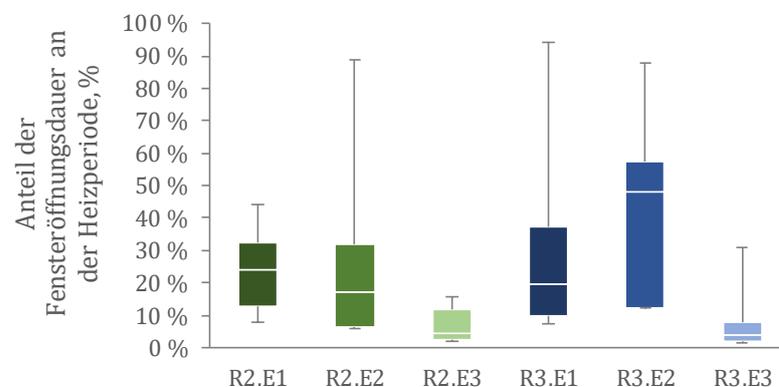


Abb. 6-17: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer im Badezimmer an der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

Das Grob der Daten liegt in der Box zwischen knapp 13 % bis zu 57 %, bei einem Medianwert von 48 %. R2.E2 und R3.E1 zeigen ähnliche Spreizungen, allerdings ist hier eine deutlich geringer ausgeprägte Box sowie ein Median im Bereich von 17 bzw. 19 % ablesbar.

Auch im Jahr 2013 verändert sich die Punktwolke zur Darstellung einer Fensteröffnungsdauer bei einer bestimmten Außentemperatur nicht (siehe *Abb. 13-28* bis *Abb. 13-31*). Die Anzahl der Fensteröffnungen variiert im Gegensatz zur vorherigen Heizperiode nur geringfügig. Allerdings ergibt sich ein verschobener Verlauf; weg von den abendlichen Öffnungen hin zu mehr Öffnungen in den Morgenstunden. Über die Heizperiode 2013 betrachtet, reduziert sich die Dauer der Fensteröffnungen im Badezimmer über alle Eingänge um 50 % gegenüber der Heizperiode 2012.

6.3.1.2 Fensteröffnungsverhalten in der Küche

Für das nutzerspezifische Öffnungsverhalten zeigt sich in der Küche ein annähernd gleiches Bild wie für das Badezimmer. Die Punktwolke ist ebenso über die mittleren Außentemperaturen verteilt, wobei in der Küche weniger Öffnungsvorgänge gemessen wurden. Hier gilt ebenfalls, dass bei geringen Außentemperaturen kleiner 0 °C kürzer gelüftet wird als bei Temperaturen über 0 °C.

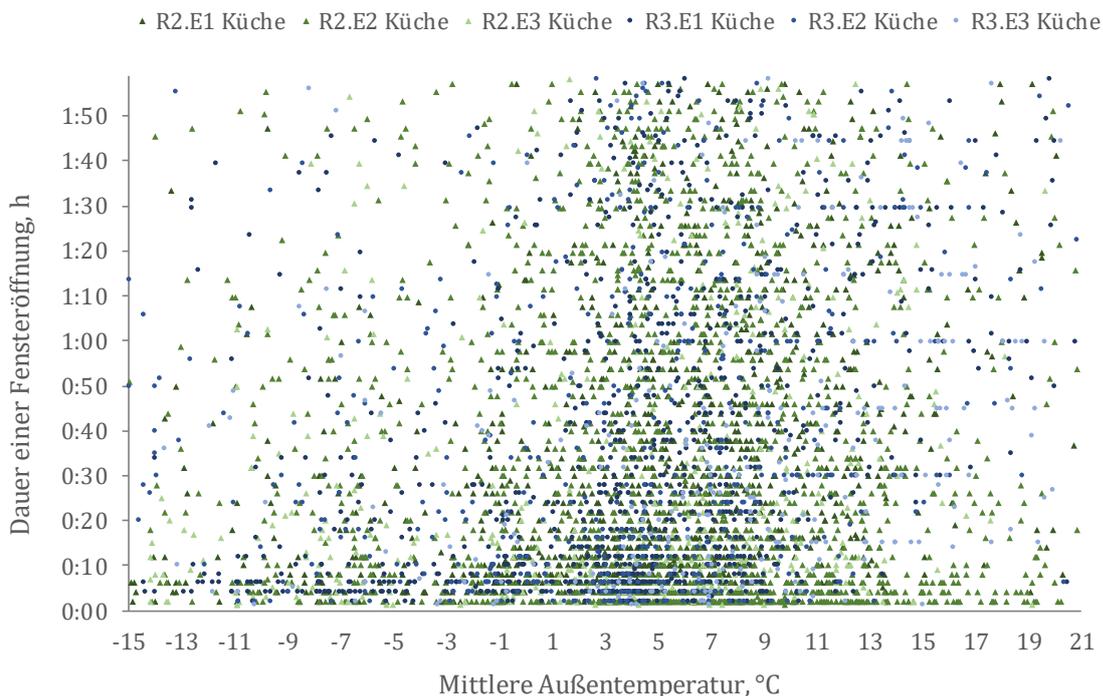


Abb. 6-18: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern in der Küche für alle Sanierungsvarianten über die mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012

Die Betrachtung des Tagesrhythmus zeigt, dass sich im Gegensatz zum Badezimmer lediglich zwei Tagesphasen ergeben (siehe *Abb. 6-19*). Zum einen die Nachtphase zwischen null und 5:00 Uhr, die im Gegensatz zum Badezimmer deutlich weniger Öffnungsvorgänge aufweist, und zum anderen die Tagphase. Bis auf die Nutzer von R2.E2 ist eine sehr heterogene

Verteilung der Fensteröffnungsvorgänge über den Tag feststellbar. Hier wird die Fensterposition während der Heizperiode über 8.000-mal verändert. In Bezug auf alle Sanierungsvarianten ergeben sich für die Küchen in R2.E2 25 % der gesamten Fensteröffnungsvorgänge.

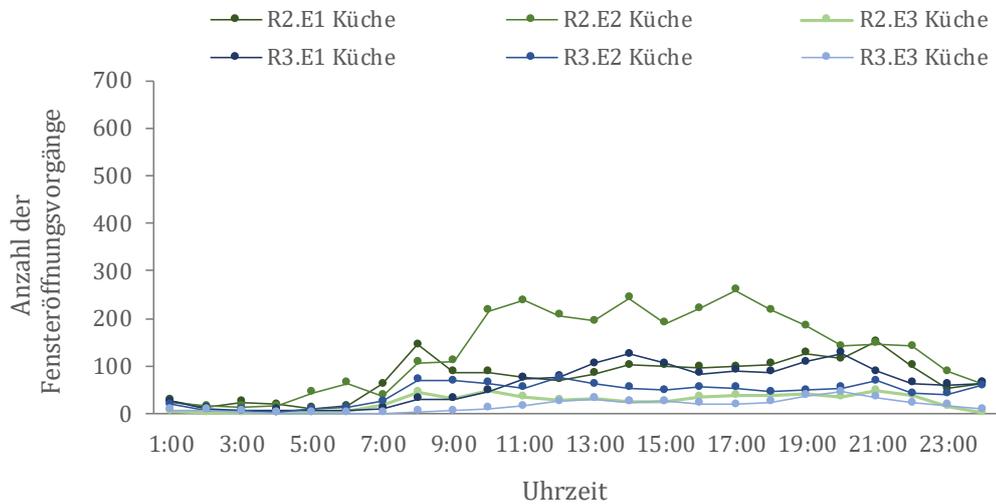


Abb. 6-19: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge je Sanierungsvariante für jeweils zehn Küchen während der Heizperiode 2012

Absolut betrachtet werden die Fenster weniger häufig geöffnet, aber über die Heizperiode betrachtet ergibt sich eine längere Fensteröffnungsdauer. In Abb. 6-20 ist der prozentuale Anteil der Fensteröffnungsdauer für jeweils zehn Küchen der Eingänge gegenübergestellt. Wie bereits der Vergleich der Badezimmer gezeigt hat, sind auch hier deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Nutzern erkennbar. Der geringste Median mit knapp 3 % ist für die Küchen von R3.E3 ablesbar. Die größte Box ergibt sich für R2.E1, der höchste Medianwert mit 59 % lässt sich für R3.E2 ablesen. Dies bedeutet, dass die zehn Küchenfenster von R3.E2 für rund 3.016 Stunden im Median geöffnet waren.

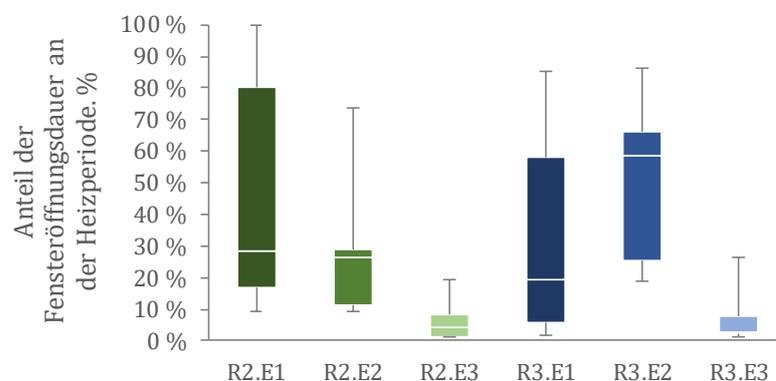


Abb. 6-20: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer in den Küchen an der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

In der Heizperiode 2013 ist eine deutliche Bündelung der Öffnungszeiten hin zu kurzen Zyklen für die Küchen aller Sanierungsvarianten zu erkennen. Die Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge im Tagesverlauf ändert sich hingegen nur marginal im Vergleich zur Heizperiode 2012. Über alle 60 Küchen und die Heizperiode summiert, ergibt sich lediglich $\frac{1}{4}$ der Gesamtöffnungszeit als in der Heizperiode 2012. Detaillierte Darstellungen sind den *Abb. 13-32* bis *Abb. 13-35* im Anhang zu entnehmen.

6.3.1.3 Fensteröffnungsverhalten im Wohnzimmer

Die Punktwolke zur Darstellung der Dauer einer Fensteröffnung während bestimmten Außentemperaturen ändert sich auch für die Wohnzimmer der Sanierungsvarianten nicht (siehe *Abb. 6-21*). Es können zwar deutlich mehr Fensteröffnungsvorgänge festgestellt werden, aber nach wie vor ist die Temperatur die treibende Kraft für die Länge einer Öffnung. Weiterhin wird bei geringen Außentemperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ kurz, im Bereich von 10 Minuten, gelüftet. Bei Außentemperaturen über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird ansonsten zwar auch eher kurz gelüftet, aber auch im Bereich von einer Stunde und mehr.



Abb. 6-21: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern im Wohnzimmer für alle Sanierungsvarianten über die mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012

Der Verlauf der Fensteröffnungsvorgänge im Tagesrhythmus ähnelt dem festgestellten Verlauf im Badezimmer. Es sind drei Phasen erkennbar. *Abb. 6-22* zeigt morgens ab 6 Uhr einen deutlichen Anstieg der Aktivitäten bis ca. 11 Uhr, danach einen leichten Rückgang über die Mittagsstunden sowie den Nachmittag und schließlich wieder ein Anstieg der Aktivitäten

ab 18 Uhr. Auch in den nächtlichen Stunden können Fensteröffnungsvorgänge festgestellt werden.

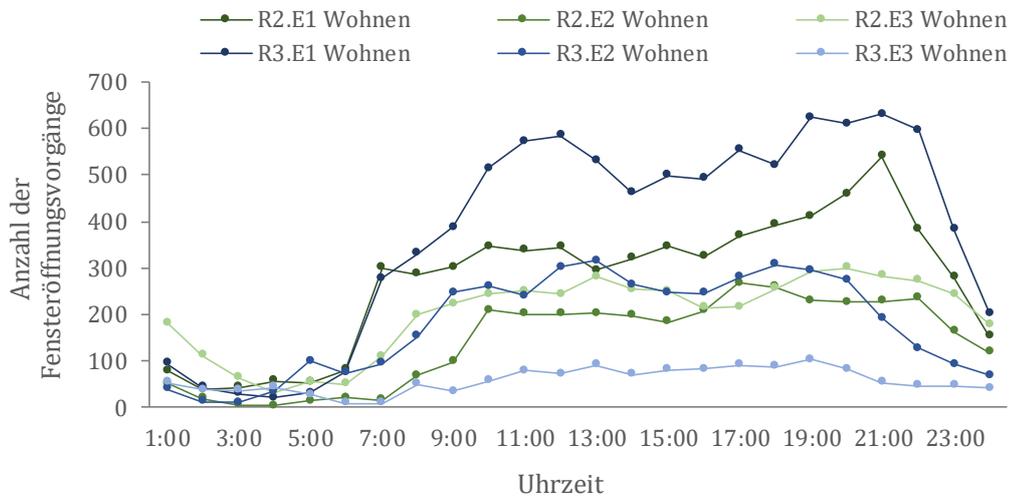


Abb. 6-22: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge je Sanierungsvariante für jeweils zehn Wohnzimmer während der Heizperiode 2012

Während der Heizperiode 2012 wird die Fensterposition in den Wohnzimmern der sechs Eingänge knapp 30.000-mal geändert. Auffällig ist dabei, dass in den Wohnzimmern von R3.E1 die Fensterpositionen genauso häufig geändert werden wie summiert in allen 60 Küchen während der Heizperiode. Dies entspricht einem Anteil von 30 % an den gesamten Fensteröffnungsvorgängen in den Wohnzimmern.

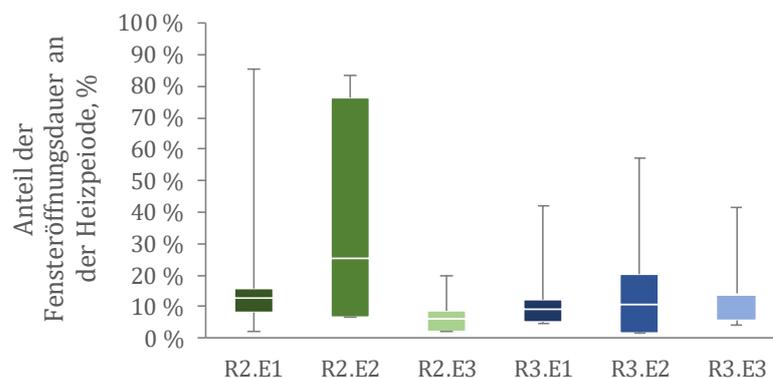


Abb. 6-23: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer in den Wohnzimmern an der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

In Abb. 6-23 ist der Anteil der Fensteröffnungsdauer an der Heizperiode (5.112 Stunden) 2012 für jeweils zehn Wohnzimmer eines Eingangs gegenübergestellt. Für R2.E2, einer Sanierungsvariante ohne maschinelle Lüftung, lässt sich die längste kumulierte Fensteröffnungsdauer ablesen. Der Median liegt hier bei knapp 26 % und das obere Quartil bei 76 %. Im Gegensatz dazu steht R2.E3, ebenfalls ohne maschinelle Lüftung, mit einem Median von

7 %, also nur knapp 350 Stunden der Heizperiode (5.112 Stunden). Trotz der vielen Fensteröffnungsaktivitäten liegt die Gesamtöffnungsdauer über alle 60 Wohnzimmer um 35 % unterhalb der Küchen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in den Wohnzimmern der Eingänge mit maschineller Lüftungsanlage (R2.E1; R3.E1; R3.E2) die Fenster weniger häufig geöffnet werden als in den übrigen Wohnungen ohne Anlagentechnik (siehe Anhang *Abb. 13-4*).

In der Heizperiode 2013 ist für die Wohnzimmer eine deutliche Konzentration der Öffnungsvorgänge auf kurze Intervalldauern feststellbar. Die Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge hat sich für alle Sanierungsvarianten erhöht. Der Verlauf der Fensteröffnungsvorgänge im Tagesverlauf ist nahezu identisch mit der Heizperiode 2012. Die kumulierte Fensteröffnungszeit über alle Eingänge reduziert sich um 50 % gegenüber der Heizperiode 2012. Ergänzende grafische Darstellungen zur Heizperiode 2013 sind dem Anhang (siehe *Abb. 13-36 bis Abb. 13-39*) zu entnehmen.

6.3.2 Gegenüberstellung des Fensteröffnungsverhaltens für die einzelnen Sanierungsvarianten

Nach der Analyse der einzelnen Räume werden die Daten wohnungsweise und anschließend pro Sanierungsvariante zusammengefasst. Das Ergebnis ist *Abb. 6-24 bis Abb. 6-26* zu entnehmen. Für die einzelnen Sanierungsvarianten zeigen sich deutliche Unterschiede im Lüftungsverhalten. In R3.E3 wird während der Heizperiode über den Tagesverlauf betrachtet am wenigsten das Fenster betätigt. Demgegenüber steht R2.E1 mit der größten Anzahl an Fensteröffnungsvorgängen. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass in R3.E3 die Fensterposition 3.641-mal gewechselt wird, in R2.E1 hingegen 18.480-mal. Die restlichen vier Sanierungsvarianten liegen mit 9.000 bis 15.000 Öffnungsvorgängen dazwischen.

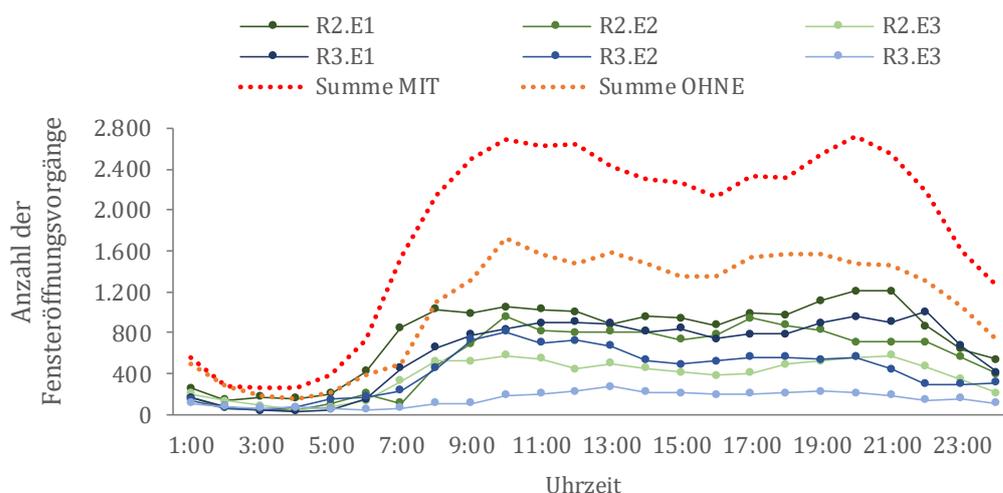


Abb. 6-24: Anzahl der Fensteröffnungen zur jeweiligen Uhrzeit für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Zum abschließenden Vergleich zwischen den Sanierungsvarianten werden ergänzend alle Eingänge mit maschineller Lüftungsanlage (R2.E1; R3.E1; R3.E2) sowie die Eingänge mit Zwangslüftung (R2.E2; R2.E3; R3.E3) zusammengefasst, siehe *Abb. 6-24*. Die Linie für die 30 Wohnungen mit maschineller Be- und Entlüftung (rot gepunktet) verläuft weit oberhalb der Kurve für die 30 Wohnungen mit Zwangsbelüftung (orange gepunktet). Im Tagesverlauf betrachtet ergibt sich für beide eine annähernd gleiche Ausprägung der Kurve. Allerdings sind die Kurven im Zeitraum zwischen 7 und 22 Uhr um knapp 750 Öffnungen gegeneinander verschoben.

Abb. 6-25 gibt Aufschluss darüber, wie lange in jeweils einer Sanierungsvariante gelüftet wird. Sowohl zwischen den einzelnen Räumen als auch Eingängen sind deutliche Unterschiede erkennbar. Die Bewohner von R3.E2 haben während der Heizperiode 2012, bis auf das Wohnzimmer, in allen Räumen die Fenster am längsten geöffnet, dies zeigt sich durch die Ausprägung der Box und Ausreißer. In Bezug auf die Dauer der Heizperiode haben die Bewohner im Median 38 % der Zeit ihre Fenster geöffnet. Der Median der Fensteröffnungsdauer von R2.E1 sowie R2.E2 unterscheidet sich allerdings nur geringfügig.

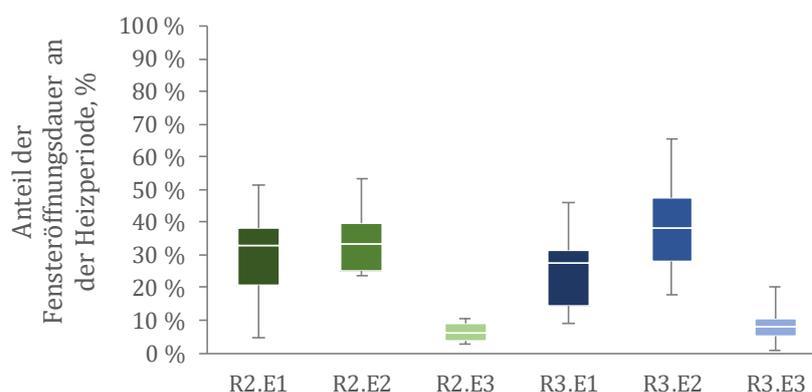


Abb. 6-25: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer in der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

Mit Abstand die geringste Fensteröffnungsdauer ist für die Eingänge R2.E3 mit 6,2 % und R3.E3 mit 7,9 % im Median zu verzeichnen. Über alle Eingänge betrachtet kann für die Wohnzimmer die kürzeste Öffnungsdauer (knapp 15 %) und für die Küchen die längste Öffnungsdauer (23,8 %) festgestellt werden. Zwischen den einzelnen Sanierungsvarianten sind dabei untereinander Abweichungen im Wohnzimmer von bis zu 80 % und in der Küche von knapp 88 % ablesbar.

Um das Lüftungsverhalten der Bewohner mit und ohne maschinelle Lüftungsanlage deutlich zu machen, wird der Anteil der Fensteröffnung an der Heizperiode 2012 für die einzelnen Räume gegenübergestellt, siehe *Abb. 6-26*. Bis auf das Wohnzimmer verlaufen die Linien für die Sanierungen mit maschineller Be- und Entlüftung (rot) oberhalb der Varianten ohne maschinelle Lüftung (rot gestrichelt). Die größte Abweichung zwischen den kumulierten Öffnungsdauern ist für die Küche feststellbar, obwohl hier die maschinelle Lüftung keinen Einfluss hat.

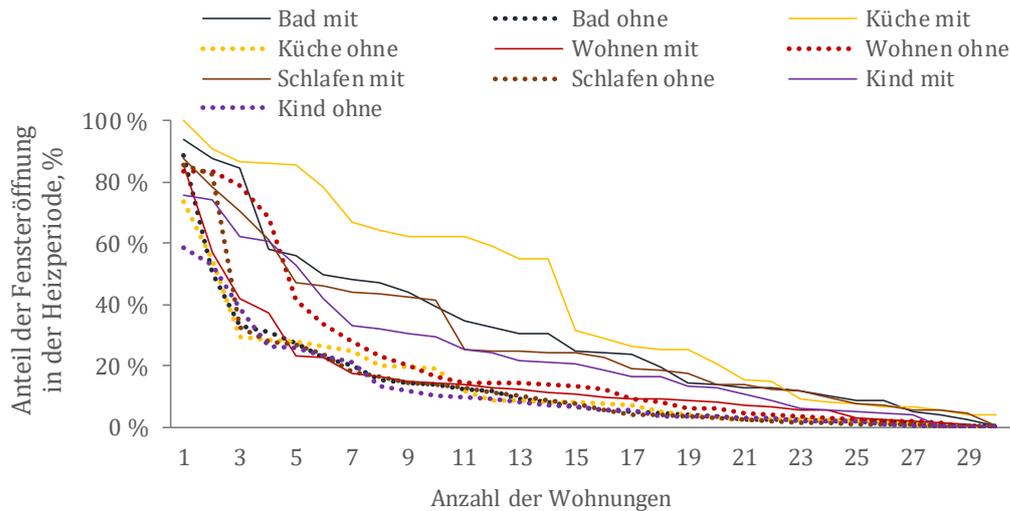


Abb. 6-26: Gegenüberstellung des Anteils der Fensteröffnung für die einzelnen Räume mit und ohne Lüftungsanlage während der Heizperiode 2012

In der Heizperiode 2013 führen die deutlich reduzierten Öffnungszeiten in den einzelnen Räumen auch bei der Betrachtung aller Sanierungsvarianten zu einem flacheren Verlauf der Kurven in Bezug auf die Dauer einer Heizperiode. Im Vergleich zur Heizperiode 2012 sind bei der Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten mit und ohne maschinelle Lüftung deutlich geringere Abweichungen zwischen den jeweiligen Werten erkennbar. Weiterhin wird in den Eingängen mit maschineller Lüftung das Fenster über eine längere Zeit geöffnet als in den Eingängen mit Zwangslüftung. Die grafische Darstellung der Ergebnisse für 2013 sind im Anhang ab Abb. 13-39 ff. zu finden.

6.3.3 Ermittlung der vorhandenen Luftwechselzahlen

Die vorliegenden Messdaten geben Aufschluss darüber, wie häufig die Fensterposition gewechselt wurde und wie lange die Fenster geöffnet waren. Damit ist aber noch keine Aussage bzgl. des tatsächlichen Luftwechsels möglich. Nach gültiger Normung sind für die EnEV-Berechnung 0,6 bzw. 0,55 h⁻¹ anzusetzen. Ob diese Werte in der Praxis tatsächlich erreicht werden, soll anhand der vorliegenden Daten überprüft werden.

Bereits in den 90-Jahren wurden Untersuchungen zum Luftwechsel in Abhängigkeit der signifikanten Parameter wie Temperaturdifferenz (innen / außen), Einbausituation und Öffnungswinkel des Fensters durchgeführt.

1994 untersucht Maas systematisch den Luftwechsel in einem Raum bei unterschiedlichen Fensterstellungen. Fazit der Untersuchungen von Maas ist, dass die Parameter Temperaturdifferenz, Wind und Einbausituation entscheidenden Einfluss auf den Luftaustausch in Räumen haben (Maas 1995).

Weitere messtechnische Untersuchungen liegen von Zeidler vor. Schwerpunkt seiner Untersuchungen war, die Grenzen thermischer Lasten zu charakterisieren (unter Berücksichtigung thermischer Behaglichkeitsparameter), die mit Fensterlüftung kompensiert werden

können. Konkrete Daten zu Luftwechselraten bei verschiedenen Temperaturdifferenzen sowie unterschiedlichen Fensterstellungen wurden lediglich an zwei geometrischen Varianten untersucht (Zeidler 2000).

Ergänzend zu den genannten Arbeiten seien hier noch die Untersuchungen von Geiger (Geiger und Rouvel 1987), Hartmann (Hartmann und Piffner 1978) und Knissel (Knissel 2003) genannt.

Da eine systematische Untersuchung bei der alle Parameter, die Einfluss auf den Luftwechsel in Räumen haben, noch nicht vorlag, hat dies Richter in seinem Forschungsvorhaben „Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht“ analysiert (Richter et al. 2003). Im Detail werden in dieser Studie die Parameter Temperaturdifferenz, Fensterstellung, Einbausituation sowie die Abhängigkeit von äußeren Einflüssen systematisch untersucht.

Die Untersuchungen wurden an einem Modellraum mit den Abmessungen 5,0 m x 4,0 m x 2,5 m im Hinblick auf die Quantifizierung der auftretenden Beträge des hygienischen Luftwechsels sowie der Effektivität des Luftaustauschs aus energetischer Sicht durchgeführt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Windeinfluss den Luftwechsel erst ab Anströmgeschwindigkeiten von ungefähr 0,5m/s dominiert. Die Bezugnahme des Luftwechsels auf die mittlere Raumlufttemperatur stellt dabei ein Kriterium dar, welches globalen Charakter besitzt. Von untergeordneter Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Anordnung des Fensters sowie der Anschlag des Fensters. Ebenfalls von geringerer Bedeutung ist die geometrische Beschaffenheit des Raumes.

Daher bilden die Forschungsergebnisse der Untersuchungen von Richter et al. zum globalen Luftwechsel die Basis zur Abschätzung des vorhandenen Luftwechsels in den sechs Sanierungsvarianten. Unter dem globalen Luftwechsel λ wird das Verhältnis vom Volumenstrom, der über die (Fenster-)Öffnungen ausgetauscht wird, zum Volumen des Raumes verstanden.

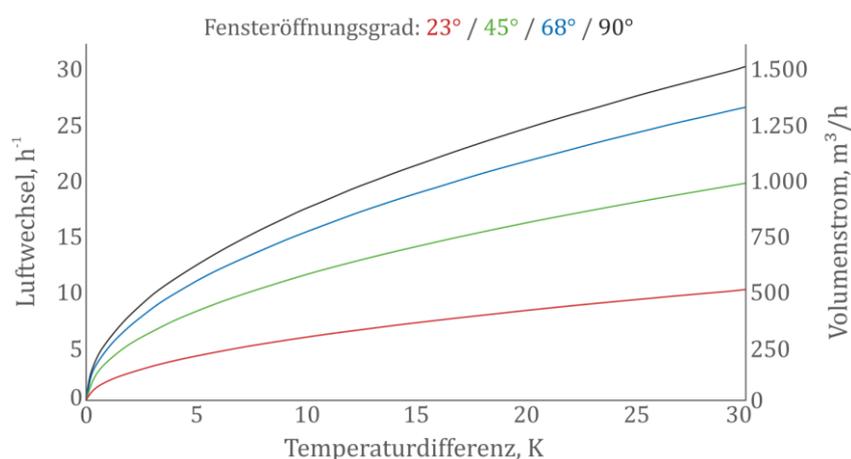


Abb. 6-27: Globaler Luftwechsel bei unterschiedlichen Fensteröffnungswinkeln in einem Modellraum von 5,0 m x 4,0 m x 2,5 m (Quelle: in Anlehnung an (Richter et al. 2003))

In *Abb. 6-27* sind die Ergebnisse aus dem Forschungsbericht von Richter et al. gezeigt, die die Basis für die weitergehenden Analysen bilden. Es wird dabei von unterschiedlichen Öffnungswinkeln ausgegangen. Ein Fenster in Kippstellung hat einen Öffnungswinkel von 6° , dies ist auch bei den Fenstern in den Sanierungsobjekten der Fall. Ein Fenster muss, wenn es voll geöffnet ist, nicht zwangsläufig einen Winkel von 90° aufweisen, alternativ werden dementsprechend auch Öffnungswinkel von 23° , 45° und 68° untersucht.

Die Daten aus *Abb. 6-27* dienen als Grundlage für die Ermittlung des Luftwechsel aus den vorliegenden Messdaten. Zum einen wird die Relation zwischen dem Fenster nach Richter et al. und den vorliegenden Fenstern gebildet, und zum anderen die Größe des Raumes in Relation gesetzt. Somit lassen sich für jede Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und außen, sowie den Öffnungswinkel über die Zeit, der sich einstellende Luftwechsel abschätzen.

Da über die Messdaten lediglich unterschieden werden kann, ob ein Fenster geöffnet oder geschlossen ist, bedarf es einer weiteren Annahme zur Unterscheidung zwischen kipp und voll geöffneten Fenstern. Auf Basis der Empfehlungen vom IWU zum Luftwechsel in Wohngebäuden werden folgende Festlegungen, siehe *Tab. 6-1*, getroffen (IWU 2012). Je größer der Temperaturunterschied zwischen innen und außen ist, desto kürzer ist die notwendige Öffnungsdauer, um einen kompletten Luftaustausch im Raum zu erzielen.

Tab. 6-1: Empfohlene Lüftungsdauer bei Stoßlüftung in den Monaten der Heizperiode (Quelle: (IWU 2012))

Monat	Lüftungszeit (Min.)
Januar, Februar, Dezember	4
März, November	8
April, Oktober	12

Für die Clusterung der Messdaten bedeutet dies, dass bspw. im Januar davon ausgegangen wird, dass das Fenster vollständig geöffnet ist, wenn die Öffnungsdauer vier Minuten nicht überschreitet. Für die Kippstellung wurde ein Winkel von 6° angesetzt und für das voll geöffnete Fenster die Öffnungswinkel von 23° , 45° , 60° und 90° untersucht. Eine Stoßlüftung bezeichnet daher einen Lüftungsvorgang, der sich nur über eine relativ kurze Zeitdistanz (im Minutenbereich), erstreckt und bei dem sich die Temperaturverhältnisse der Umfassungsflächen nur geringfügig ändern.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass mehr längere als kürzere Lüftungszyklen in den einzelnen Wohnungen vorzufinden sind, was dazu führt, dass die vollständig geöffneten Fenster vielmehr einen kleineren Anteil am Gesamtluftwechsel haben. Zur Festlegung des Luftwechsels wurden daher die Werte einer 90° Öffnung des Fensters angesetzt, um somit das Maximum abzubilden.

6.3.3.1 Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung im Badezimmer

In Abb. 6-28 sind die Luftwechselzahlen für die Badezimmer der einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012 gegenübergestellt; hierbei zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Eingängen. Während der Median für den Fensterluftwechsel für R2.E3 bei $0,21 \text{ h}^{-1}$ und für R3.E3 unter $0,1 \text{ h}^{-1}$ liegt, weichen die Mediane der anderen Eingänge deutlich nach oben ab. Den maximalen Median liefert R2.E1 mit $1,1 \text{ h}^{-1}$.

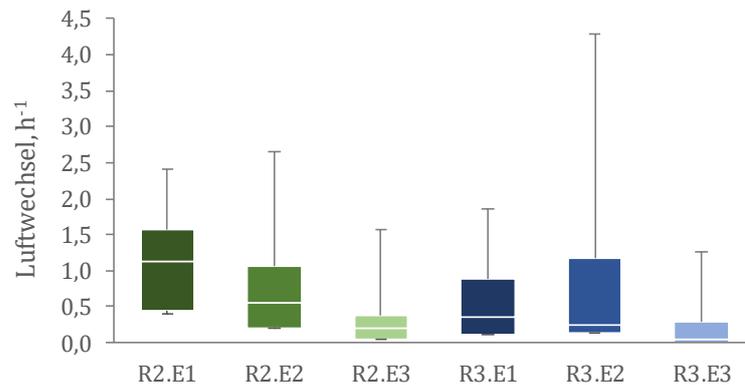


Abb. 6-28: Gegenüberstellung des Luftwechsels im Badezimmer für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Für R2.E3 und R3.E3 ist ebenfalls die kleinste Spreizung zwischen den Quartilen ablesbar ist. Unterschiede von bis zu $1,0 \text{ h}^{-1}$ sind für die restlichen Eingänge feststellbar. Die größte Varianz zwischen den einzelnen Datenpunkten ist für R3.E2 vorhanden; hier liegt das Maximum einer einzelnen Wohnung bei einem Luftwechsel über $4,0 \text{ h}^{-1}$. Auch für R2.E1 und R2.E2 wurden in den einzelnen Badezimmern Werte oberhalb eines zweifachen Luftwechsels festgestellt.

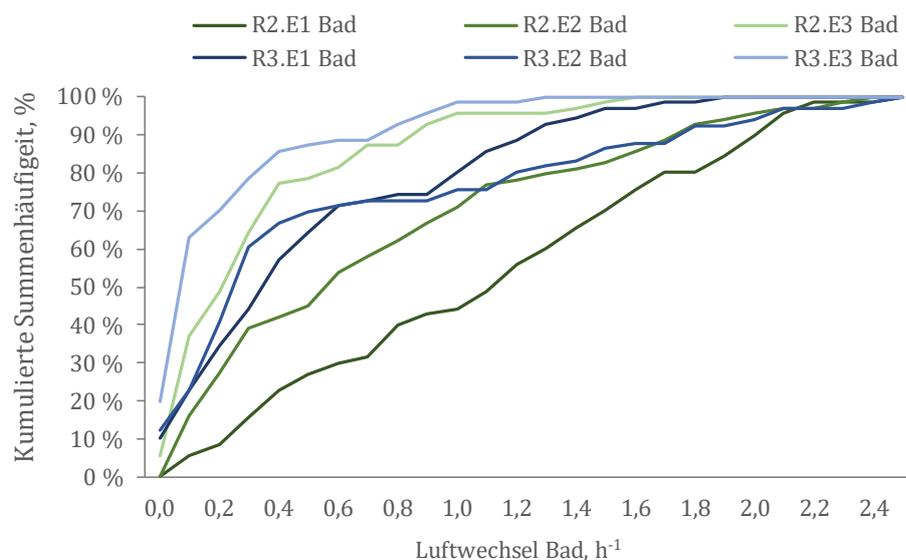


Abb. 6-29: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten der Badezimmer je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

Ergänzend gibt *Abb. 6-29* Aufschluss darüber, wie häufig der jeweilige Luftwechsel in den einzelnen Bädern einer Sanierungsvariante vorhanden ist. Für R3.E3 wird bei einer Luftwechselzahl von $1,3 \text{ h}^{-1}$ die 100 %-Grenze der kumulierten Summenhäufigkeit erreicht. Für R2.E1 und R3.E2 wird diese Grenze erst bei einem Wert von $2,5 \text{ h}^{-1}$ erreicht. Diese Darstellung macht noch einmal deutlich, wie unterschiedlich das Lüftungsverhalten der Nutzer in ihren Badezimmern ist.

6.3.3.2 Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung in der Küche

Für den Luftwechsel in den Küchen ergibt sich ein anderes Bild als für die Badezimmer. Dieses unterscheidet sich sowohl in der Abweichung zwischen den oberen und unteren Quartilen, aber auch in der Größe der auftretenden Maxima. Für die Küche in R3.E3 ist nahezu kein Luftwechsel vorhanden. Hier ist zwischen dem einzelnen Nutzerverhalten in den zehn Wohnungen entsprechend keine große Varianz ablesbar. Anders verhält es sich in R2.E2. Zwischen den einzelnen Nutzern sind Unterschiede im stündlichen Luftwechsel von bis zu $2,0 \text{ h}^{-1}$ feststellbar. Der Median des Luftwechsels schwankt zwischen den einzelnen Eingängen zwischen $0,03 \text{ h}^{-1}$ für R3.E3 und $0,6 \text{ h}^{-1}$ für R2.E2.

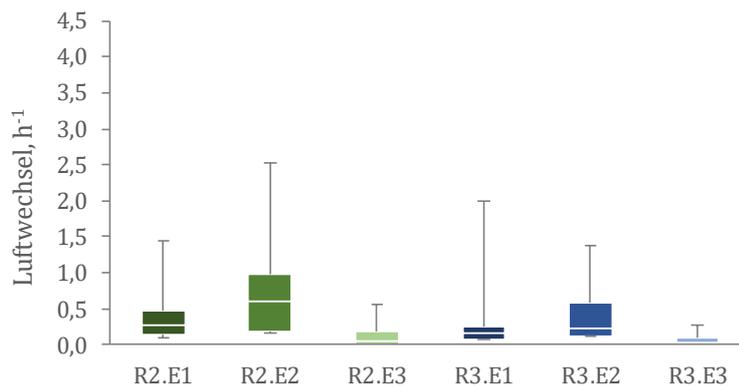


Abb. 6-30: Gegenüberstellung des Luftwechsels in den Küchen für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Das Bild der geringen Luftwechselraten wird auch noch einmal über die Darstellung der kumulierten Summenhäufigkeit der Luftwechselzahlen, siehe *Abb. 6-31*, für die einzelnen Sanierungsvarianten deutlich. Die Linien verlaufen deutlich steiler als für die Badezimmer. Für R3.E3 wird die 100 %-Grenze bereits bei einem Luftwechsel von $0,6 \text{ h}^{-1}$ erreicht. Während dies erst ab einem Wert von $2,4 \text{ h}^{-1}$ bei R2.E2 der Fall ist.

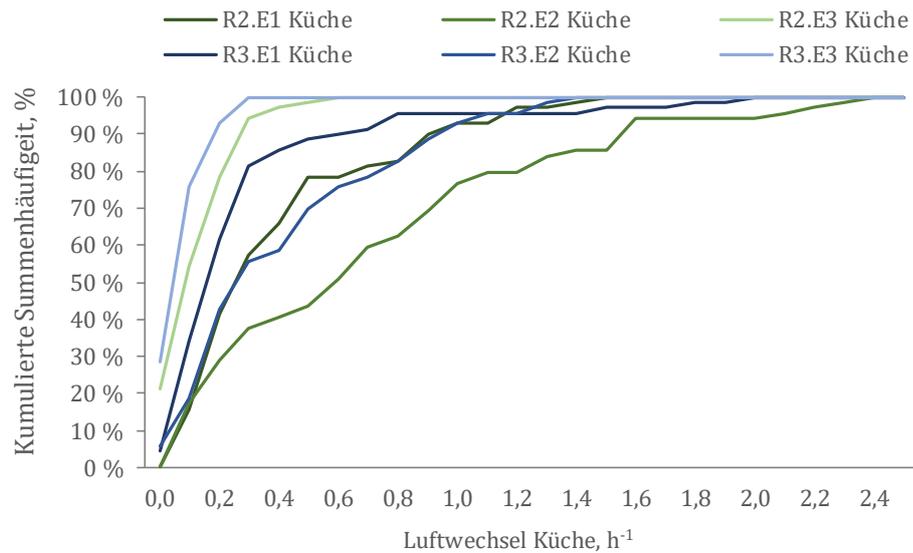


Abb. 6-31: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten der Küchen je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

6.3.3.3 Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung im Wohnzimmer

Eine weitere Reduzierung des Luftwechsels zeigt sich für die Wohnzimmer der einzelnen Sanierungsvarianten. Für diesen Raum ist bei fast allen Eingängen, bis auf R3.E2, die geringste Schwankungsbreite zwischen dem oberen und unteren Quartil vorzufinden. Der Median für den Luftwechsel ist sehr gering. Für R3.E3 beläuft sich dieser auf $0,03 \text{ h}^{-1}$ und für R3.E1 auf $0,17 \text{ h}^{-1}$. Wobei zu beachten ist, dass in R3.E1 eine maschinelle Lüftungsanlage verbaut wurde und eine manuelle Fensteröffnung theoretisch nicht nötig ist. Die Varianz im Lüftungsverhalten zwischen den einzelnen Wohnungen einer Sanierungsvariante, aber auch zwischen den einzelnen Sanierungsvarianten, ist nicht so ausgeprägt wie in den Badezimmern und Küchen.

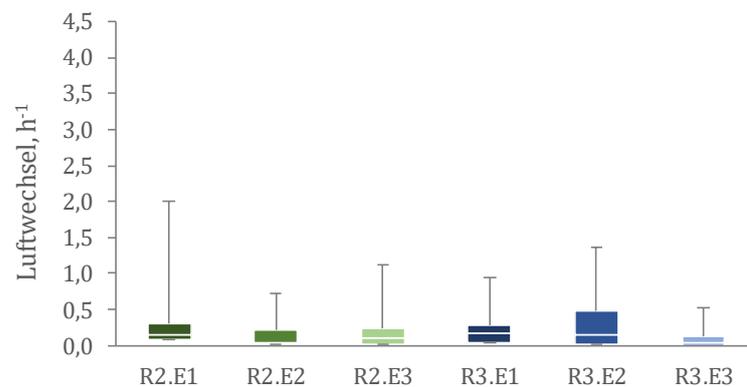


Abb. 6-32: Gegenüberstellung des Luftwechsels im Wohnzimmer für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Die Linien der kumulierten Summenhäufigkeit verlaufen für die Wohnzimmer der verschiedenen Sanierungsvarianten im Gegensatz zu den anderen Räumen im Bündel. Die Krümmungen verlaufen deutlich steiler, was auf die Häufigkeit von geringen Luftwechselzahlen schließen lässt. Des Weiteren sind deutlich geringere Abweichungen zwischen den einzelnen Eingängen als bei den Badezimmern und Küchen vorzufinden. Während die 100 %-Grenze für R3.E3 bereits bei einem Luftwechsel von $0,3 \text{ h}^{-1}$ erreicht ist, liegt dieser Wert für R2.E1 bei $2,1 \text{ h}^{-1}$.

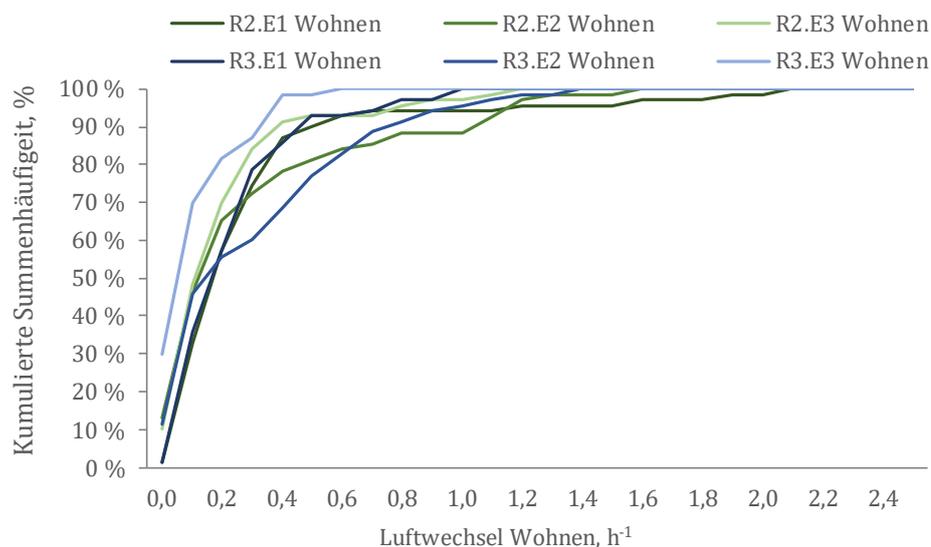


Abb. 6-33: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten der Wohnzimmer je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

6.3.4 Gegenüberstellung der Luftwechselzahlen durch Fensterlüftung für die einzelnen Sanierungsvarianten

In einem letzten Schritt findet die Übertragung der Raumdaten in Wohnungs- respektive Eingangsdaten statt, um diese Werte entsprechend untereinander aber auch mit den normativen Ansätzen der EnEV vergleichen zu können.

Für alle Sanierungsvarianten zeigt sich ein homogenes Bild, mit wenig stark ausgeprägten Maxima. In Abb. 6-34 werden die Sanierungsvarianten mit maschineller Lüftung und die Varianten mit Zwangslüftung gegenüber gestellt. Trotz der maschinellen Lüftung sowie des Zwangsluftwechsels, welche hier nicht ergänzend dargestellt sind, sind in den einzelnen Eingängen Fensterluftwechsel zwischen $0,12 \text{ h}^{-1}$ (R3.E1) und $0,4 \text{ h}^{-1}$ (R2.E1) vorzufinden. Der Median verläuft nahezu konstant zwischen $0,21 \text{ h}^{-1}$ und $0,29 \text{ h}^{-1}$. Ein anderes Bild zeigt sich für die Varianten mit Zwangslüftung. Hier verlaufen die unteren Quartilswerte bei $0,02 \text{ h}^{-1}$ (R3.E3) und die oberen Quartilswerte bei $0,4 \text{ h}^{-1}$ (R2.E2). Ein ebenso uneinheitlicher Median ergibt sich für die einzelnen Eingänge. Hier sind Werte zwischen $0,05 \text{ h}^{-1}$ für R3.E3 und $0,27 \text{ h}^{-1}$ für R2.E2 vorzufinden.

Die aktuelle Energieeinsparverordnung EnEV schreibt in § 6 vor, dass Gebäude dauerhaft luftundurchlässig abzudichten sind. Zur Ermittlung der Lüftungswärmeverluste wird daher

eine Luftwechselrate $0,6 \text{ h}^{-1}$ bzw. $0,55 \text{ h}^{-1}$ (mit Abluftanlage) angesetzt. Bei Vorhandensein einer maschinellen Lüftungsanlage müssen diese Werte entsprechend den Vorgaben der Planung angepasst werden. Gleichzeitig muss aber der zum Zwecke der Gesundheit und Beheizung notwendige Mindestluftwechsel sichergestellt werden. Parallel zu den ordnungsrechtlichen Vorgaben der EnEV ist hierzu die DIN 1946 Teil 6 mit Vorgaben zur Planung, Dimensionierung und Ausführung von Lüftungstechnischen Maßnahmen anzuwenden.

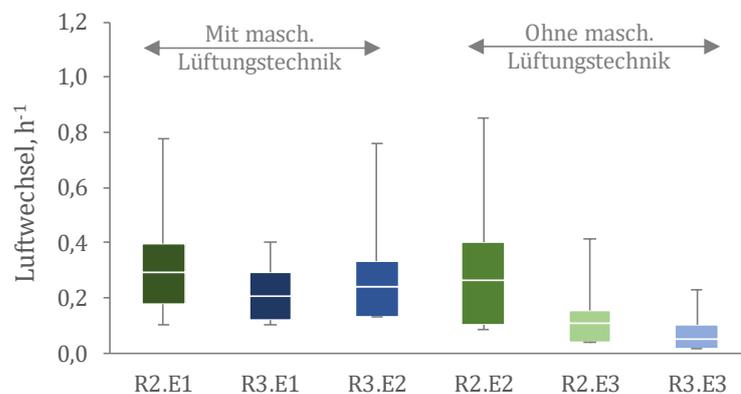


Abb. 6-34: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012

Im vorliegenden Beispiel zeigt sich, dass die abgeschätzten Werte des Fensterluftwechsels weit unterhalb der normativen Ansätze liegen. Allerdings muss ergänzend bedacht werden, dass es sich bei den dargestellten Werten lediglich um die Fensterlüftung und den dadurch erzwungenen Luftwechsel handelt. Alle Sanierungsvarianten verfügen entweder über Zwangslüftungssysteme als auch eine maschinelle Lüftung, die jeweils laut Planung den hygienischen Luftwechsel sicherstellen können und somit theoretisch überhaupt nicht über die Fenster gelüftet werden muss.

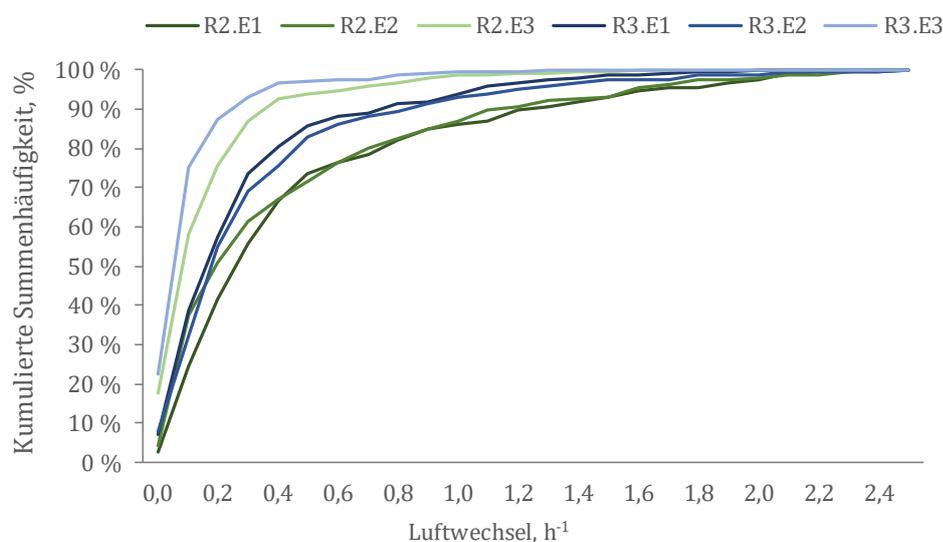


Abb. 6-35: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012

Die Linien der kumulierten Summenhäufigkeit sind bei der wohnungs- bzw. eingangswweisen Betrachtung nicht so deutlich gebündelt wie es bei den Wohnzimmern der Fall war. Die deutlichen Unterschiede im Nutzerverhalten sind entsprechend ablesbar. Für R3.E3 wird bereits bei einem Luftwechsel von $1,3 \text{ h}^{-1}$ die 100 %-Grenze erreicht, für R2.E1 und R3.E2 ist dies erst bei einem Wert von $2,4 \text{ h}^{-1}$ der Fall.

In der Heizperiode 2013 ergeben sich aufgrund der ermittelten kürzeren Öffnungszeiten sowie der geringeren Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge bei der Ermittlung der Luftwechselraten für die einzelnen Räume, als auch für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten, geringere Werte. Der Abstand zwischen dem oberen und unteren Quartil fällt in der Heizperiode 2013 entsprechend geringer aus. Die Mediane der Luftwechsel liegen zwischen $0,08 \text{ h}^{-1}$ für R3.E3 und $0,29 \text{ h}^{-1}$ für R2.E2. Die grafische Darstellung dieser Ergebnisse ist dem Anhang ab *Abb. 13-40* ff. zu entnehmen.

6.3.5 Auswirkungen des ermittelten Luftwechsels auf die Bedarfsberechnungen nach EnEV

Welchen Einfluss die Änderung des manuellen Luftwechsels auf den Heizwärmebedarf nach EnEV mit sich bringt zeigt *Abb. 6-36*. Hier ist der Heizwärmemehrbedarf für die einzelnen Sanierungsvarianten bei unterschiedlichen Luftwechselraten aufgetragen. Da es sich bei den Ergebnissen aus der Abschätzung lediglich um manuelle Fensterluftwechsel handelt, wurde vereinfachend der geplante mittlere maschinelle Luftwechsel bzw. die Zwangslüftungsrate ergänzt.

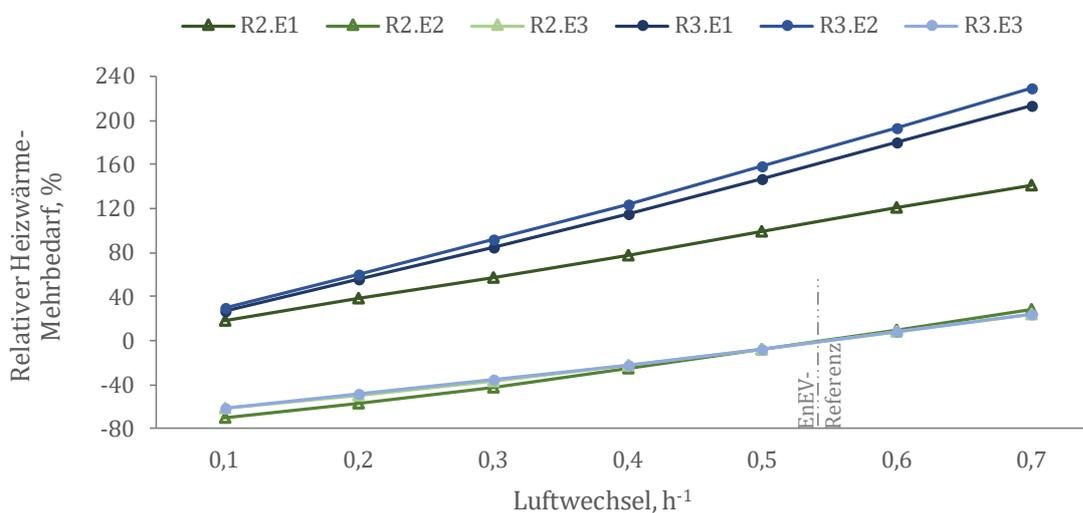


Abb. 6-36: Einfluss des Luftwechsels auf den Heizwärmebedarf nach EnEV

Da keine Aussagen darüber vorhanden sind, in wie weit auf die maschinelle Lüftung zur Belüftung der Wohnung zurückgegriffen wird, dient diese Methode lediglich zu einer groben Abschätzung. Im Bereich der Zwangslüftung kann sich dagegen auf die Produktdatenblätter bezogen werden, da die eingebauten Elemente dauerhaft und zwangsweise für einen Luftaustausch sorgen. Außer in dem Fall, dass diese mutwillig zugeklebt wurden, dies wird hier

ebenfalls nicht berücksichtigt. Dementsprechend verlaufen die Linien für die Sanierungen mit maschineller Lüftung lediglich im Bereich des relativen Heizwärmemehrbedarfs. Die Änderung der Luftwechselrate um $0,1 \text{ h}^{-1}$ führt bei den Eingängen mit Zwangslüftung zu einem Mehr- bzw. Minderbedarf von 20 %.

Die Messdatenanalyse hat gezeigt, dass die Nutzer in den sanierten Gebäuden, trotz Installation unterschiedlicher Lüftungstechnik, einen Fensterluftwechsel im Bereich von $0,1$ bis $0,4 \text{ h}^{-1}$ erzeugen. Untersuchungen anderer Forschungseinrichtungen zeigen ebenfalls, dass in Gebäuden mit Fensterlüftung die gemessenen Luftwechselzahlen in Abhängigkeit der Luftdichtheit der Gebäudehülle aber vor allem vom Nutzerverhalten abhängen und Werte im Bereich von $0,3$ bis $0,9 \text{ h}^{-1}$ annehmen (Reiß und Erhorn 1994). Bei hohen Belegungsdichten der Wohnungen sind auch Werte bis zu $1,5 \text{ h}^{-1}$ vorzufinden (Kluttig und Erhorn 1998). Neuere Untersuchungen bestätigen diese Schwankungsbreite in ähnlicher Form auch für Gebäude mit Wohnungslüftungsanlagen (Erhorn und Reiß 2010).

In Abb. 6-37 sind die berechneten Bedarfswerte nach EnEV sowie unter Berücksichtigung des gemessenen Luftwechsels den witterungsbereinigten Verbrauchswerten gegenübergestellt. Lediglich bei der Sanierungsvariante von R3.E2 ist eine gute Übereinstimmung zwischen den Verbrauchswerten und den angepassten Bedarfswerten festzustellen. Die Abweichung zwischen den beiden Werten beträgt weniger als 5 %.

Die markantesten Abweichungen zwischen den Bedarfswerten unter Berücksichtigung des individuellen Luftwechsels und den Verbrauchswerten ist für R2.E1 und R2.E3 ablesbar. Während bei R2.E1 durch die Berücksichtigung des manuellen Fensterluftwechsels der Bedarf deutlich überschätzt wird, führt die Berücksichtigung des Lüftungsverhaltens in R2.E3 zu einer deutlichen Unterschätzung des Heizwärmebedarfs. Des Weiteren zeigt sich, dass die Sanierungsvarianten mit Zwangslüftung - R2.E2, R2.E3 und R3.E3 - den Heizwärmebedarf unter Berücksichtigung des ermittelten Luftwechsels unterschätzen.

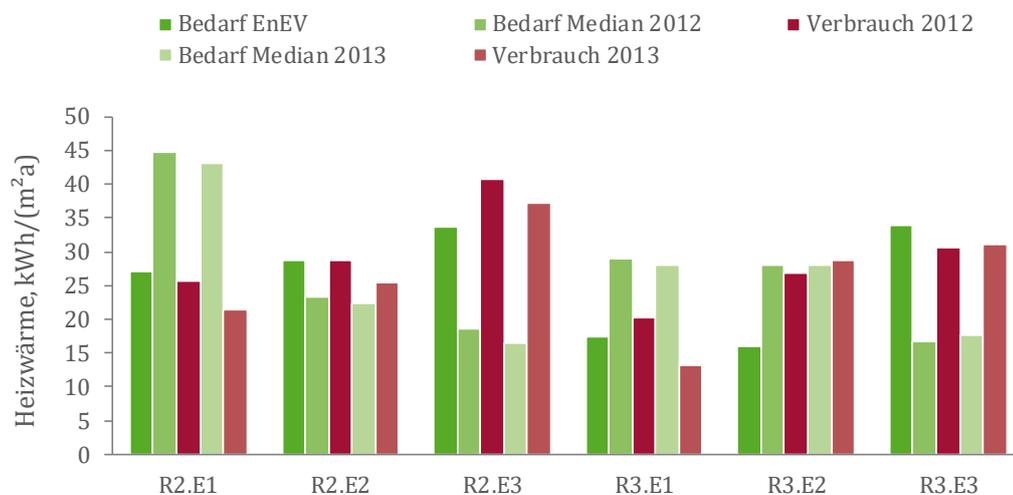


Abb. 6-37: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse des Heizwärmebedarfs nach Norm und jeweils mit dem mittleren Luftwechsel (Grüntöne) sowie der Verbrauchswerte (Rottöne) für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten

6.4 Betrachtung der internen Wärmegewinne

Bei der Betrachtung der internen Wärmegewinne in privaten Haushalten ist es nicht nur wichtig diese von anderen Wärmeeinträgen abzugrenzen, sondern auch ihr Auftreten zu untersuchen. Unter Auftreten sind in diesem Zusammenhang die Höhe der internen Wärmegewinne sowie deren zeitliche Verteilung innerhalb eines Betrachtungsintervalls, bspw. eines Tages, zu verstehen.

Bezogen auf die Betrachtung der internen Wärmegewinne privater Haushalte wird im Folgenden angenommen, dass die meisten wärmeabgebenden Haushaltsgeräte mit elektrischer Energie versorgt werden, um betrieben werden zu können. Um also eine Aussage über das Auftreten der Wärmegewinne treffen zu können, wird die Abnahme elektrischer Energie eines Haushaltes anhand von Literaturquellen sowie Statistiken abgeschätzt.

6.4.1 Ansätze zur Bilanzierung interner Wärmegewinne aus der Literatur

In ihrem Abschlussbericht über die Novellierung der VDI 2067 behandeln Esdorn und Mügge den Einfluss der Wärmegewinne auf den Wärmebedarf. Dabei gehen sie davon aus, dass die solaren Einträge den wesentlichen Anteil der Wärmegewinne in einem Gebäude verursachen (Mügge und Esdorn 1986). Zu den möglichen inneren Wärmequellen zählen Personen, Beleuchtungsanlagen sowie im Gebäude betriebene Geräte. Hierbei unterscheiden sie zwischen trockener und feuchter Wärmeabgabe und erachten eine Nutzung der latenten Wärme nur in begrenztem Ausmaße als möglich (Mügge und Esdorn 1986). Aufgrund der Vielzahl an möglichen inneren Wärmequellen und dem Einfluss der Nutzer können lediglich Aussagen über die Höhe der inneren Wärmequellen in statistischer Form getroffen werden. Als Lösungsansatz schlagen sie das Vorhandensein einer Berufstätigkeit, als eine den Nutzereinfluss stark beeinflussende Größe, vor (Mügge und Esdorn 1986).

Da aufgrund fehlender Daten keine präzisere Aussage über die jeweiligen Beschäftigungen der Nutzer möglich ist, ist es notwendig, den pro Nutzer abgegebenen Wärmestrom als konstant anzunehmen und folglich nur zu unterscheiden, ob sich ein Nutzer im Gebäude aufhält oder nicht.

Für Wohngebäude werden von Mügge und Esdorn die internen Wärmegewinne in einen Anteil für Personen, sowie einen von ihnen bezeichneten Sockelbetrag aufgeteilt (Mügge und Esdorn 1986). Dieser fixe Beitrag zu den internen Wärmegewinnen berücksichtigt eine für einen privaten Haushalt charakteristische Geräteausstattung und, dass diese Geräte, zum Beispiel eine Kühltruhe, sowohl ständig, als auch unabhängig von der Haushaltsgröße betrieben werden. Letzteres trifft für bestimmte Gerätegruppen, zum Beispiel Küchengeräte bei Ein- bis Zweipersonenhaushalten durchaus zu, ist aber heute in Bezug auf in privaten Haushalten häufig vorhandene Geräte, wie bspw. Computer und Fernseher, nur noch beschränkt zutreffend. Die Anzahl der Haushaltsgeräte nimmt mit wachsender Haushaltsgröße nur langsam zu. Die Menge der Geräte aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik hingegen steigt proportional zur Anzahl der Personen pro Haushalt.

Esdorn und Mügge erarbeiten abschließend zu ihren Überlegungen Ansätze zur Quantifizierung der Wärmegewinne, um die Nutzbarkeit der internen Wärmegewinne darzustellen. Hierzu formulieren sie einen Fremdwärmenutzungsgrad (Mügge und Esdorn 1986). Dieser Fremdwärmenutzungsgrad ist direkt vom Verhältnis des Jahresheizwärmebedarfs zum Fremdwärmeeintrag abhängig.

6.4.2 Entwicklung der Berücksichtigung interner Wärmegewinne in der Normung

Die internen Wärmegewinne werden indirekt im Entwurf der VDI 2067 Blatt 2 von 1979 und den vorhergegangenen Fassungen dieser Norm berücksichtigt (Wetzlaff 1983). In diesem Entwurf wird ein Korrekturfaktor für die Jahresheizarbeit vorgeschlagen, wobei der Faktor, ein Ausgleichsfaktor für den Norm-Wärmebedarf, den Einfluss von Sonnenstrahlung und inneren Wärmequellen abbilden soll.

In der Fassung des Entwurfs der VDI 2067 von 1985 wird dieser Ansatz aufgenommen und ein weiterer Korrekturfaktor eingeführt, so dass die Jahresheizarbeit mit einem entsprechenden Faktor zu korrigieren ist (VDI 2067 Blatt 1). Die Sonneneinträge und internen Wärmegewinne finden über den Faktor f_1 mit einem Wert von 0,78 Eingang in den Korrekturfaktor f (Mügge und Esdorn 1986). Eine Gewichtung der solaren und inneren Wärmeeinträge sowie eine Berücksichtigung eines Ausnutzungsgrades findet nicht statt. In der Fassung der VDI 2067 Blatt 2 aus dem Jahr 1993 werden die Sonneneinträge und internen Wärmegewinne nicht mehr als Korrekturfaktor des Normwärmebedarfs betrachtet, sondern direkt als Summand bei der Bestimmung des Jahresheizwärmeverbrauchs berücksichtigt.

In der Norm werden für den Ansatz der internen Gewinne Werte vorgeschlagen, die von der Nutzungsart des Gebäudes abhängig sind. Dabei werden Werte zwischen 38 und 80 kWh/(m²a) angenommen. Als Flächenbezug dient hier die beheizte Nutzfläche nach VDI 3807. Der Korrekturfaktor f berücksichtigt zum einen über den Faktor f_F die Anlagentechnik, und zum anderen über den Faktor η_F die bezogene Sonneneinstrahlung. Letztere wird als das Verhältnis von Sonneneinträgen zu internen Wärmegewinnen definiert (VDI 3807 Blatt 1).

In der Wärmeschutzverordnung hingegen werden die internen Wärmegewinne erstmalig in der dritten Fassung im Jahre 1995 berücksichtigt. Hier wird zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden unterschieden. Ergänzend wird ein Maximalwert für die Höhe der anrechenbaren Wärmegewinne angegeben, der bei Nichtwohngebäuden um 25 % über dem der Wohngebäude liegen darf. Dieser beträgt für die Wohngebäude $Q_i = 8 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$ bezogen auf das anrechenbare Luftvolumen, sofern die lichte Höhe mehr als 2,6 m beträgt. Im anderen Fall sind 25 kWh/(m²a) bezogen auf die Gebäudenutzfläche anzusetzen.

Nach Ehm beruhen diese Werte auf einer durchschnittlichen Tagesleistung der internen Wärmequellen von ungefähr 7 W/(m²d) bei Zugrundelegung von 224 Heiztagen, eines 2,7-Personen-Haushaltes, sowie eines Verhältnisses von Nettogrundfläche zu Wohnfläche von

1,28 und einem mittleren Ausnutzungsgrad der internen Wärme von η_a von 0,85 (Ehm 1996).

In der EnEV 2002 und EnEV 2004 wird für Wohngebäude jeweils im Anhang 1 ein Wert für die internen Wärmegewinne angegeben. Dieser Wert bildet die Grundlage bei der Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs von Wohngebäuden. Die in der DIN V 18599 hinterlegten Nutzungsprofile beruhen auf den Ergebnissen einer Studie von DS-Plan in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), in der ein Planungswerkzeug zur Ermittlung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden entwickelt worden ist. In der EnEV 2007 werden die internen Wärmegewinne im vereinfachten Verfahren zur Bestimmung des Jahres-Heizwärmebedarfs abhängig vom Verhältnis der Summe aus spezifischen Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten zur Gebäudenutzfläche betrachtet. Hieraus ergeben sich zwei Werte differenziert nach der Gebäudenutzung, EFH oder MFH, mit 2,1 bzw. 4,2 W/m². Die nutzflächenabhängigen, tabellierten Wärmeleistungen können ebenfalls der DIN V 4108-6 entnommen werden. Im Rahmen des EnEV-Nachweises sind entsprechend pauschale Mittelwerte von 5 W/m² zu verwenden.

6.4.3 Ermittlung der Basisdaten zur Bestimmung der internen Wärmegewinne für die betrachteten Gebäude

6.4.3.1 Mieterstrukturen

Auf der Grundlage der Daten des Amtes für Stadtentwicklung der Stadt Karlsruhe aus dem Jahre 2011 sind in Rintheim etwa 2.731 Haushalte vorzufinden (Amt für Stadtentwicklung Karlsruhe 2010). Bei 38 % handelt es sich um Ein-Personen-Haushalte, bei 26 % um Paare ohne Kinder und bei 21 % um Paare mit Kindern. Diese drei Haushaltstypen bilden die Mehrheit der Haushalte in Rintheim und sollen deshalb im Folgenden als Grundtypen von Haushalten angenommen werden. Aus den Daten der Mieterbefragungen zeigt sich ebenfalls, dass die Daten des Zensus für das Rintheimer Feld für die weitergehenden Betrachtungen genutzt werden können. Die Belegungsdichte einer Wohnung beträgt, bezugnehmend auf einen von der Stadt Karlsruhe erhobenen Wert, zwei Personen pro Wohnung (Amt für Stadtentwicklung Karlsruhe 2011).

Eine Erhebung des statistischen Bundesamtes hat gezeigt, dass die Ausstattung von Haushalten mit elektrischen Geräten, im Bereich von geringen bis mittleren Einkommen sehr ähnlich ist (Destatis 2014a). Deshalb wird im Weiteren die nominelle Haushaltsgröße genutzt, um private Haushalte voneinander unterscheiden zu können. Um aber trotzdem das Vorhandensein einer Erwerbstätigkeit ansatzweise abbilden zu können, wird angenommen, dass Berufstätige 60 % und nicht Berufstätige 90 % des Tages innerhalb ihrer Wohnung anwesend sind.

6.4.3.2 Angesetzter Bilanzraum

Als Bilanzraum dient die Fläche einer durchschnittlichen Wohnung der drei Riegel. Da die pauschalen Richtwerte für flächenbezogene interne Wärmegewinne in der DIN V 4108-6 Tabelle 2 auf die Nutzfläche bezogen sind, wird im Folgenden eine einheitliche Nutzfläche von einem Zehntel der Gesamtnutzfläche pro Riegel zugrunde gelegt. Basierend auf der Veröffentlichung von Usemann wird angenommen, dass die Wärmeabgabe der Nutzer konstant 90 W pro Person beträgt (Usemann 2004).

Bei der Entwicklung der Größe der privaten Haushalte in Deutschland lassen sich zwei gegenläufige Trends beobachten: Die durchschnittliche Haushaltsgröße nimmt ab, wohingegen die Fläche pro Haushalt sowie pro Person zunimmt. Mögliche Erklärungsansätze sind hierfür der demografische Wandel, insbesondere in der Überalterung der Gesellschaft. Die Entwicklung der Fläche wird hier auf die Entwicklung der Wohn- und der Nutzfläche im Sinne der EnEV beschränkt.

6.4.4 Abschätzung der internen flächenbezogenen Wärmeströme und Zusammenwirken der einzelnen Quellen

6.4.4.1 Einfluss der Nutzer

Obwohl das Nutzerverhalten einen starken Einfluss auf die Höhe der internen Wärmegewinne hat, wird für die weiteren Berechnungen angenommen, dass die Nutzer die internen Wärmegewinne nur dadurch beeinflussen können, ob sie sich innerhalb ihrer Wohnung aufhalten oder nicht. Es wird außerdem unterstellt, dass sich eine berufstätige, beziehungsweise schulpflichtige Person, 60 % des Tages innerhalb der Wohnung aufhält und eine nicht berufstätige 90 % des Tages (siehe Kapitel 6.4.3.1). Alle weiteren Einflussgrößen werden durch den jährlichen Stromverbrauch abgeschätzt. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die elektrischen Geräte ihre aufgenommene elektrische Energie größtenteils in Wärme umsetzen.

6.4.4.2 Abschätzung des Stromverbrauchs privater Haushalte

Es existieren verschiedene Möglichkeiten zur Prognose des Stromverbrauchs privater Haushalte bspw. mittels Simulationsrechnungen und ähnlichem. Für die weitere Betrachtung wird die Abschätzung des Stromverbrauchs anhand von statistischen Daten verwendet.

Es wird angenommen, dass bei der nominellen Haushaltsgröße der Stromverbrauch eines Ein-Personen-Haushaltes bezüglich seiner Ausprägung am wenigsten streut (Frondelet al. 2015). Die Streuung nimmt mit steigender nomineller Haushaltsgröße zu, wobei es jedoch eine Haushaltsgröße gibt, ab der diese nicht mehr ansteigt. Da die Streuung ab der Haushaltsgröße „3+x“ nicht mehr zunimmt (siehe *Abb. 6-38*) und zahlenmäßig große private Haushalte in Deutschland selten vorkommen, werden hier ausschließlich die Ein-, Zwei- und Drei-Personen-Haushalte untersucht.

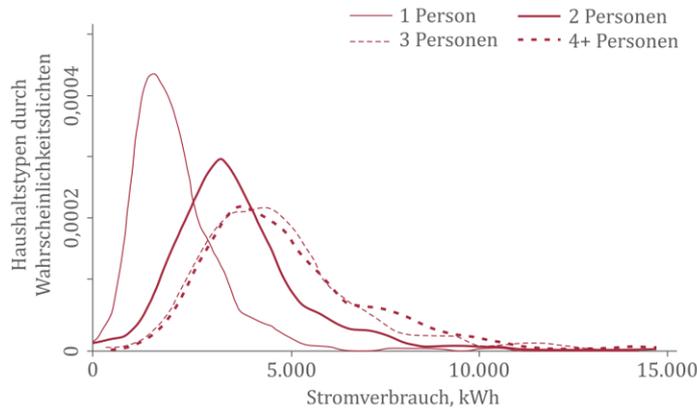


Abb. 6-38: Verteilung des Stromverbrauchs privater Haushalte nach Haushaltsgröße (in Anlehnung an (Frondelet al. 2015))

6.4.4.3 Abschätzung der Geräteausstattung und Betriebsdauer

Die Zusammenstellung der Stromverbräuche ist einer Publikation der AG Energiebilanzen e.V. entnommen worden. Hier wird der Stromverbrauch privater Haushalte bezogen auf typische Geräte abhängig von der Haushaltsgröße pro Jahr angegeben (RWI 2013). Auf Basis der Angaben des Statistischen Bundesamtes wird eine Liste für einen Ein-Personen-Haushalt inklusive der wahrscheinlich dort befindlichen Geräten erstellt (Destatis 2014b). Die Details für den Ein-Personen-Haushalt sind Tab. 6-2 zu entnehmen.

Tab. 6-2: Geräteausstattung eines Ein-Personen-Haushaltes

Art	Durschn. Stromverbrauch kWh/a
Beleuchtung	210
Kühlschrank	436
Waschmaschine	50
Fernseher	271
Computer	75
Summe	1.042

Tab. 6-3: Geräteausstattung eines Zwei-Personen-Haushaltes ohne Kind

Art	Durschn. Stromverbrauch kWh/a
Beleuchtung	360
Kühlschrank	424
Waschmaschine	93
Fernseher	522
Computer	113
Gefriertruhe	378
Spülmaschine	401
Summe	2.291

Die Zusammenstellung für den Zwei-Personen-Haushalt basiert auf derselben Quelle wie für die Ein-Personen-Haushalte. Die Werte unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Geräteausstattung, der Höhe der Stromverbräuche und der Beleuchtung. Diese wurden mit 10 % des Jahresstromverbrauchs des entsprechenden Haushaltstyps angenommen.

Die Ergebnisse der Zusammenstellung für den Zwei-Personen-Haushalt mit und ohne Kind sind *Tab. 6-3* und *Tab. 6-4* zu entnehmen.

Tab. 6-4: Geräteausstattung eines Zwei-Personen-Haushaltes mit Kind

Art	Durschn. Stromverbrauch kWh/a
Beleuchtung	430
Kühlschrank	428
Waschmaschine	143
Fernseher (2x)	534
Computer (2x)	120
Gefriertruhe	393
Spülmaschine	451
Summe	2.499

6.4.4.4 Abschätzungen der flächenbezogenen internen Wärmeströme

Für die weitergehenden Berechnungen wird davon ausgegangen, dass sich die einzelnen Wärmequellen nicht beeinflussen und somit addiert werden dürfen. Eine berufstätige Person gibt eine Wärmemenge von 473,04 kWh pro Jahr innerhalb der Wohnung ab (Usemann 2004). Dieser Wert legt die Wärmeabgabe von 90 W pro Person zu Grunde und berücksichtigt dabei die Anwesenheit mit 0,6 über 24 Stunden pro Tag über 365 Tage. Ergänzend wird angenommen, dass der gesamte Stromverbrauch der sich im Haushalt befindlichen Geräte ebenfalls in Wärme umgesetzt wird. Damit ergibt sich für den betrachteten Haushalt eine jährliche Wärmemenge von 1.515,04 kWh/a. Unter Berücksichtigung der normativen Heizperiode von 185 Tagen pro Jahr und einer vorhandenen Nutzfläche nach EnEV von 72,1 m² ergibt sich ein flächenbezogener Wärmestrom von:

$$q_i = \frac{\frac{1.515,04}{72,1}}{24 \cdot 185} \cdot 1.000 = 4,73 \text{ W/m}^2 \quad (19)$$

Sämtliche Berechnungen für die unterschiedlichen Haushaltsgrößen basieren auf demselben Rechengeschema und denselben Annahmen. Es ergeben sich somit Werte von 4,73 W/m² für den berufstätigen Ein-Personen-Haushalt bis hin zu 13,68 W/m² für nicht berufstätige Zwei-Personen-Haushalte mit Kind. Lediglich im Fall der Single-Haushalte stimmt der ermittelte Wert in etwa mit den Vorgaben der Normung überein. In allen übrigen Fällen sind die anfallenden Wärmeströme deutlich höher als die in der DIN V 4108-6 festgelegten 5 W/m². Die Werte für die weiteren Haushaltsgrößen mit den dazugehörigen internen Wärmeströmen können *Tab. 6-5* entnommen werden.

Tab. 6-5: Abschätzung des mittleren internen Wärmestroms für unterschiedliche Haushaltstypen

Art	Interner flächenbezogener Wärmestrom W/m^2
Ein-Personen-Haushalt; berufstätig	4,73
Ein-Personen-Haushalt; nicht berufstätig	5,47
Zwei-Personen-Haushalt ohne Kind; beide berufstätig	10,14
Zwei-Personen-Haushalt ohne Kind; einer berufstätig	10,89
Zwei-Personen-Haushalt ohne Kind; nicht berufstätig	11,62
Zwei-Personen-Haushalt mit Kind; beide berufstätig	12,20
Zwei-Personen-Haushalt mit Kind; nicht berufstätig	13,68

6.4.5 Auswirkungen der ermittelten internen Gewinne auf den Heizwärmebedarf nach EnEV

Die vorangegangenen Berechnungen der internen Gewinne machen deutlich, dass der normative Ansatz nach DIN V 4108-6 nur für einen Haushaltstyp - berufstätiger Ein-Personen-Haushalt – annähernd zutreffend ist. Laut Statistik ist der Ein-Personen-Haushalt in Deutschland häufig vorzufinden (Destatis 2015). Auch die Überalterung der Gesellschaft trägt zu dieser Wohnform bei.

Welche Auswirkungen ein geänderter Ansatz der internen Wärmegewinne bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs nach EnEV haben kann, veranschaulicht *Abb. 6-39*. Hier sind auf der X-Achse sämtliche Werte aus *Tab. 6-5* (4 bis $14 W/m^2$) und die Auswirkung in Prozent auf den Heizwärmebedarf aufgetragen.

Durch die Sanierungsvarianten im Bereich der wärmeübertragenden Umfassungsfläche sowie die verbaute Lüftungstechnik mit WRG (R2.E1 sowie R3.E1 + R3.E2) ergeben sich unterschiedliche Kurven. Die Kurven für R2.E3 und R3.E3 verlaufen aufgrund der nahezu gleichen Sanierung identisch; dies gilt ebenfalls für R2.E1 und R2.E2. Der minimale Unterschied ist hier durch die unterschiedliche Lüftungstechnik zu erklären. Den größten Einfluss auf den Heizwärmebedarf haben die internen Gewinne im Fall von R3.E1 und R3.E2. Hier ist jeweils Lüftungsgeräte mit einem hohen Wärmerückgewinnungsgrad verbaut.

Bei einer Unterschreitung des normativen Wertes von $5 W/m^2$ um lediglich $1 W/m^2$ sind Überschreitungen des Heizwärmebedarfs von 12 (R3.E3) bis zu 22 % (R3.E2) abzulesen. Die größte Reduzierung des Heizwärmebedarfs von im Mittel 14 % ist für die Erhöhung von 5 auf $6 W/m^2$ zu erkennen. Ab $10 W/m^2$ nimmt der Einfluss der interne Wärmegewinne auf die Reduzierung des Heizwärmebedarfs deutlich ab. Hier stellt sich zudem die Frage, ob die internen Gewinne überhaupt noch nutzbar sind bzw. zu Zeiten auftreten, an denen diese Lasten vom Nutzer gewünscht werden. Ansonsten würde dies ggfs. zu erhöhtem Lüftungsverhalten der Bewohner führen.

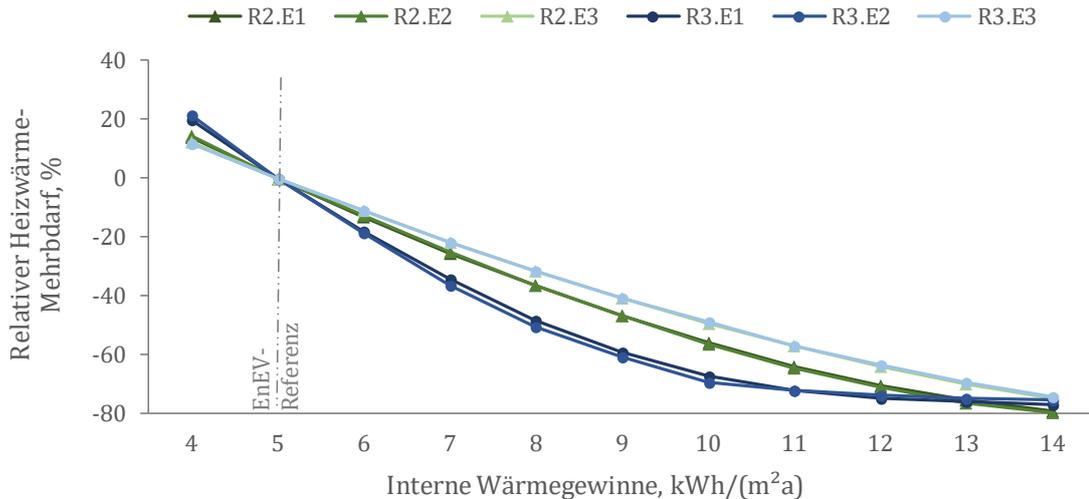


Abb. 6-39: Einfluss der internen Gewinne auf den Heizwärmeverbrauch in Prozent

Auf Basis der Befragungen und statistischen Daten für Karlsruhe wird für die weiteren Berechnungen und zum Abgleich mit den Verbrauchswerten ein Ansatz der Durchmischung der Bewohnerstruktur gewählt. 45 % der Haushalte werden als Ein-Personen-Haushalt angesetzt. Weitere 30 % entfallen auf Zwei-Personen-Haushalt ohne Kinder und letztlich 25 % auf Zwei-Personen-Haushalte mit Kind. Aus dieser Aufteilung ergibt sich für die weiteren EnEV-Berechnungen ein Durchschnittswert von $8,9 \text{ W/m}^2$ für die internen Gewinne in Bezug auf Karlsruhe Rintheim. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Ansätze im Vergleich zu den Verbrauchswerten sind Abb. 6-39 zu entnehmen.

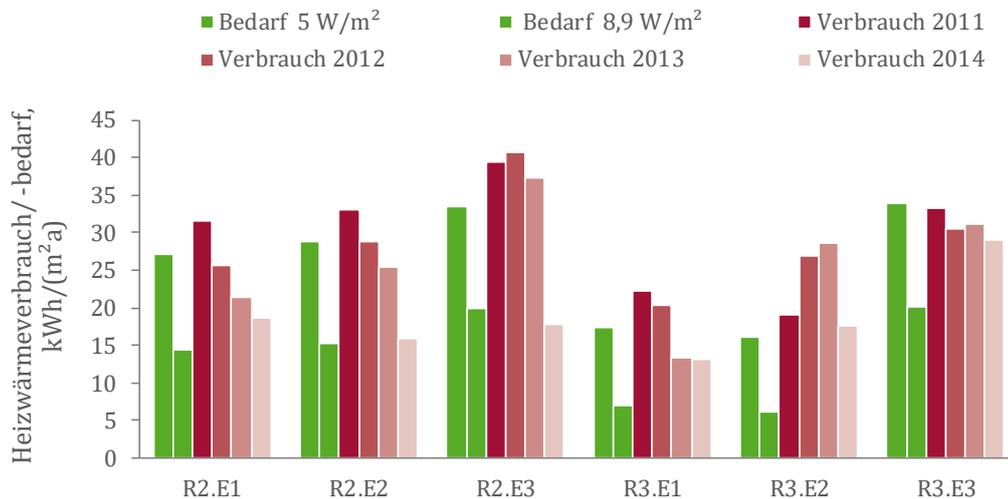


Abb. 6-40: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse des Heizwärmebedarfs mit 5 W/m^2 und $8,9 \text{ W/m}^2$ (Grüntöne) sowie der Verbrauchswerte (Rottöne) für die unterschiedlichen Sanierungen

Für sämtliche Sanierungsvarianten ist deutlich zu erkennen, dass der Ansatz von $8,9 \text{ W/m}^2$ für die internen Gewinne den Heizwärmebedarf deutlich unterschätzt. Lediglich im Jahr

2014 ist für R2.E3 ein annähernd gleicher Verbrauchs- wie Bedarfswert festzustellen. Für die anderen Sanierungsvarianten und Jahre ist eher eine gute Übereinstimmung der Bedarfsdaten auf Basis von 5 W/m^2 mit den Verbrauchsdaten zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die internen Gewinne nicht als alleinige Einflussgröße betrachtet werden können. Durch die gute Dämmung der wärmeübertragenden Umfassungsflächen kommt es des Weiteren dazu, dass die internen Gewinne an Bedeutung gewinnen. Erhöhte interne Gewinne können daher zu erhöhten Innenraumtemperaturen führen. Diese werden durchaus von den Bewohnern gewünscht (siehe Kapitel 6.2), müssen aber zum richtigen Zeitpunkt auftauchen, anderenfalls werden sie abgelüftet.

6.5 Analyse des Trinkwarmwasser-Energieverbrauchs für die dezentralen Systeme

Der Energiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitung hängt ab von der Nutzung des Gebäudes und der damit verknüpften Anforderungen an den Warmwasserkomfort sowie der eingesetzten Anlagentechnik (mit und ohne Wasserbevorratung im Speicher). Zur Bemessung der Leistung für die Warmwasserbereitung wird in der Regel eine Kaltwassertemperatur von 10 °C angenommen. Die zu erzielenden Warmwassertemperaturen schwanken je nach Art der Entnahmekategorie zwischen 45 °C für Waschbecken, Duschen und Badewannen sowie 60 °C für Küchenzwecke. Diese Daten bilden die Grundlage für die normativen Ansätze.

Nach DIN V 4701-10 ist für die Ermittlung des Nutzenergiebedarfs für die Trinkwarmwasserbereitung ein Wert von $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf die Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV anzusetzen. Im Gegensatz dazu wird nach DIN V 18599 ein Wert von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf die jeweilige Wohnfläche vorgegeben. Durch entsprechende Umrechnung auf das vorliegende Gebäude ergibt sich ein zu berücksichtigender Wert von $13,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

6.5.1 Gegenüberstellung von Zapfprofilen

Wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch und die benötigte Warmwassermenge in einem Wärmeverteilsystem haben die angenommenen Zapfprofile, d. h. die Anzahl, Dauer und Verteilung der Wasserentnahmen über den Tag. Daten über den Warmwasserverbrauch verschiedener Haushaltskonstellationen liegen aus Regelwerken, z. B. VDI 2067, vor.

In *Abb. 6-41* ist beispielhaft ein Zapfprofil für ein Mehrfamilienhaus aufgetragen. Es lassen sich zwei Maxima pro Tag erkennen, zum einen in den Morgenstunden zwischen sechs und zehn Uhr und zum anderen in den Abendstunden zwischen 19 und 21 Uhr. Diese stark vereinfachten Zapfprofile dienen zur groben Auslegungsrechnung von Speichern und Wärmeübertragern.

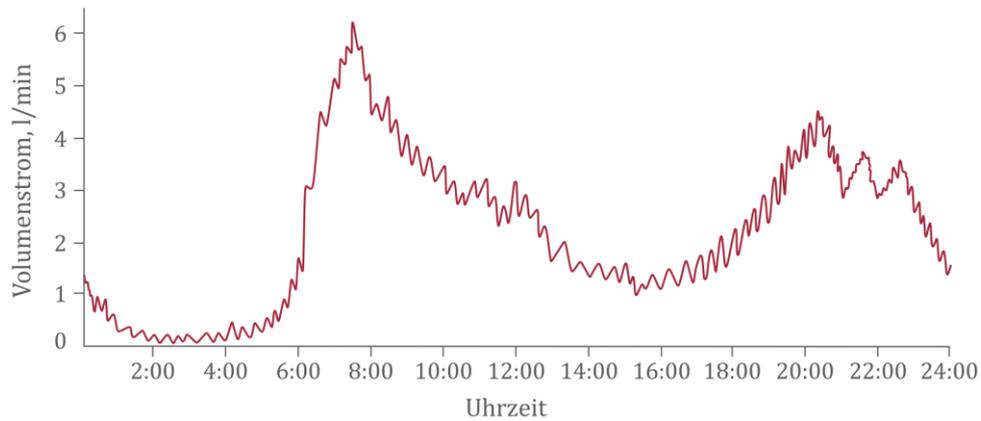


Abb. 6-41: Tagesverlauf des Zapfprofils eines Mehrfamilienhauses (Quelle: in Anlehnung an (Viessmann 2008))

Für die Analyse des Trinkwarmwasserzapfverhaltens sowie den damit einhergehenden Energieverbrauch stehen, wie bereits in Kapitel 5.2 erläutert, 40 Wohnungen zur Verfügung. In Abb. 6-42 bis Abb. 6-45 ist das Zapfverhalten der Nutzer mit dezentralen Trinkwarmwassersystemen für die Sanierungsvarianten R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 über den Tag während der Heizperiode 2012 aufgetragen. Es lässt sich feststellen, dass das Nutzerverhalten sehr individuell ist. Während für R2.E1 noch ein ähnlicher Verlauf wie in Abb. 6-41 vorzufinden ist, unterscheidet sich das Zapfverhalten für die anderen Wohnungen deutlich. Hier sind keine nennenswerten Ausprägungen in den Morgen- und Abendstunden erkennbar. Vielmehr wird in einzelnen Wohnungen kontinuierlich über den ganzen Tag Trinkwarmwasser gezapft. Die unterschiedliche Anzahl an Zapfvorgängen über den Tagesverlauf lassen auf unterschiedliche Zapfereignisse sowie Lebensrhythmen schließen.

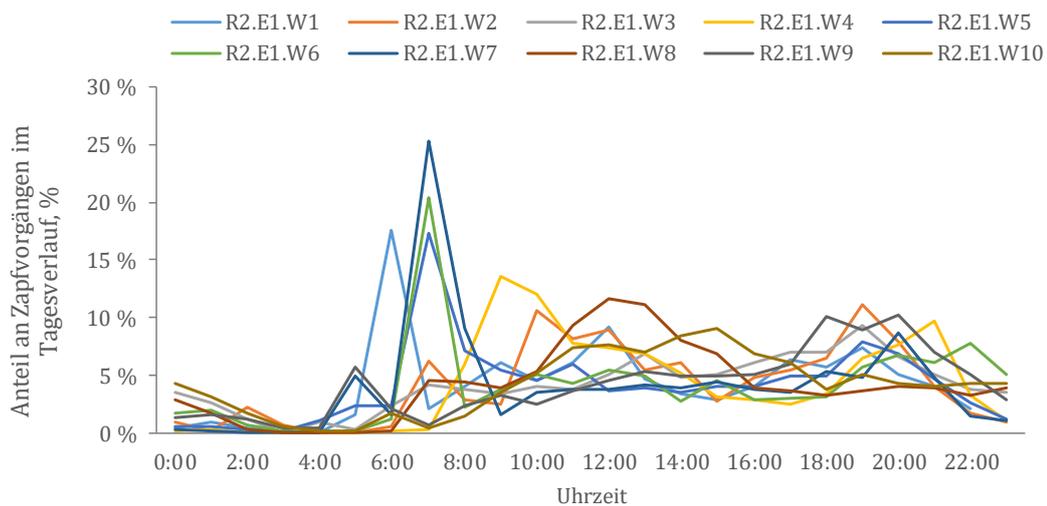


Abb. 6-42: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R2.E1 während der Heizperiode 2012

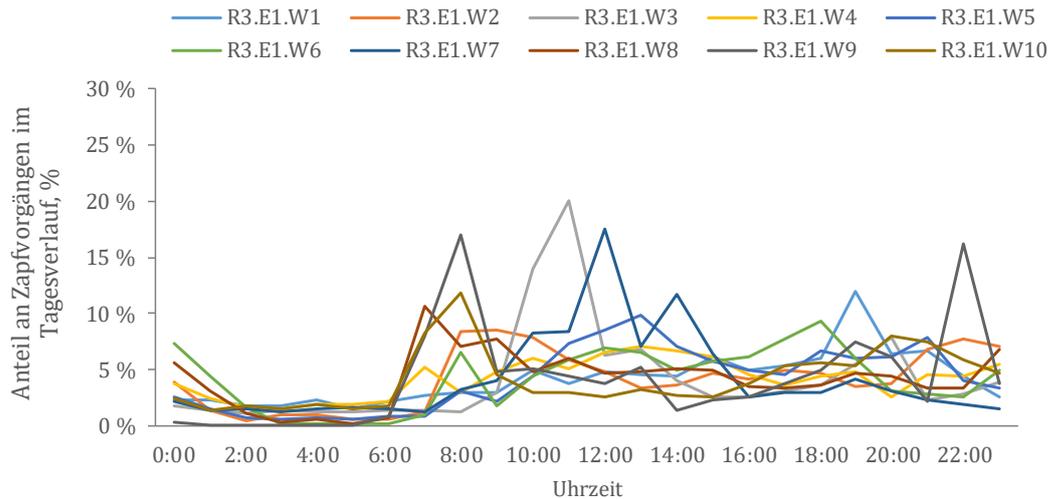


Abb. 6-43: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E1 während der Heizperiode 2012

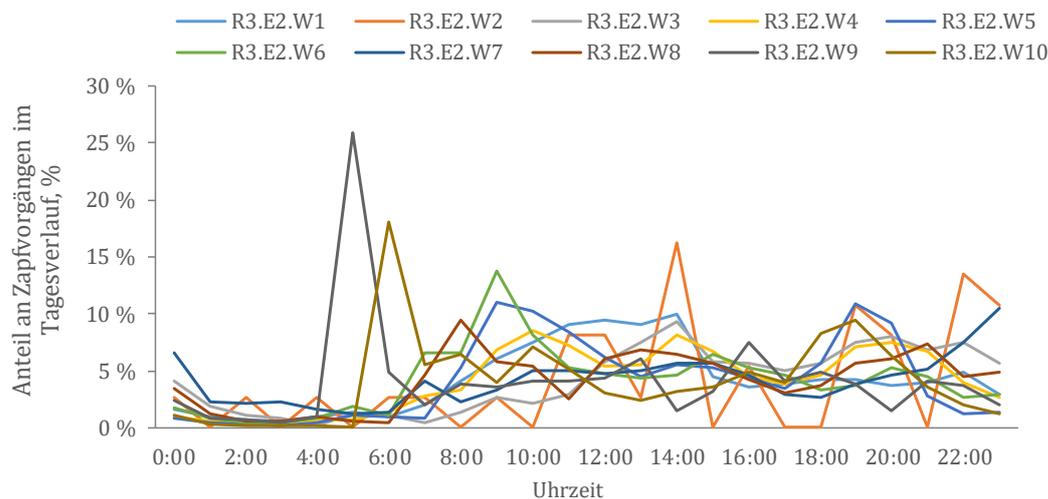


Abb. 6-44: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E2 während der Heizperiode 2012

Zu den Zapfereignissen zählen kurze Entnahmen, beispielsweise für Händewaschen, sowie mittlere Entnahmen (z. B. für Geschirr spülen). Die Bäder wurden unterschiedlich ausgestattet, so dass für die Körperhygiene noch zwischen Baden und Duschen unterschieden werden muss.

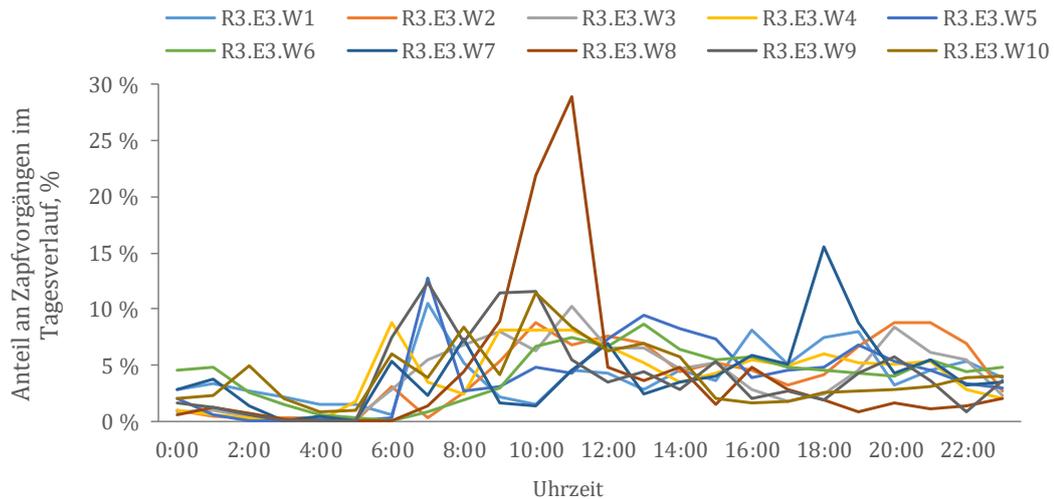


Abb. 6-45: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E3 während der Heizperiode 2012

In den Abb. 6-46 bis Abb. 6-49 ist das kumulierte Zapfverhalten pro Sanierungsvariante für die Heizperiode 2012 aufgetragen. Auch hier ergibt sich das gleiche Bild wie bereits beim wohnungsweisen Vergleich. Während sich für R2.E1 ein annähernd standardisiertes Zapfverhalten ablesen lässt, weichen die Profile der anderen Sanierungsvarianten, R3.E1 bis R3.E3, deutlich davon ab. Allerdings lässt sich festhalten, dass die Zapfvorgänge innerhalb der einzelnen Monate der Heizperiode für alle Sanierungsvariante nur geringfügig von einander abweichen. Das Nutzerverhalten stellt sich in Bezug auf das Zapfverhalten relativ saison- bzw. temperaturunabhängig dar.

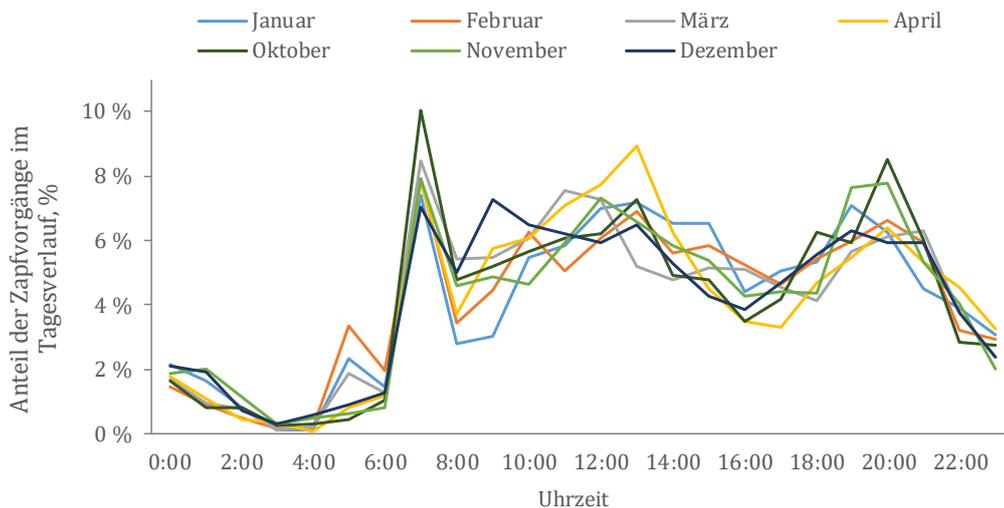


Abb. 6-46: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R2.E1 pro Monat der Heizperiode 2012

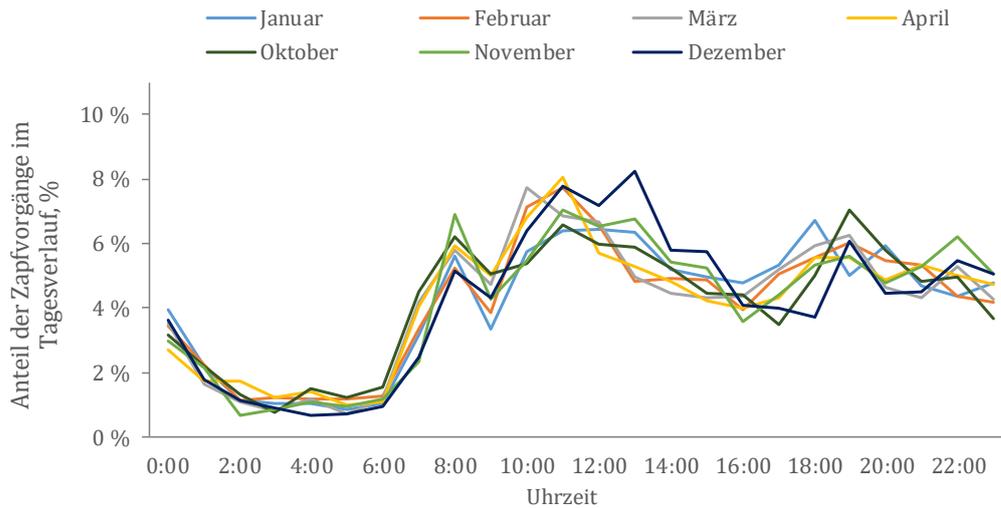


Abb. 6-47: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E1 pro Monat der Heizperiode 2012

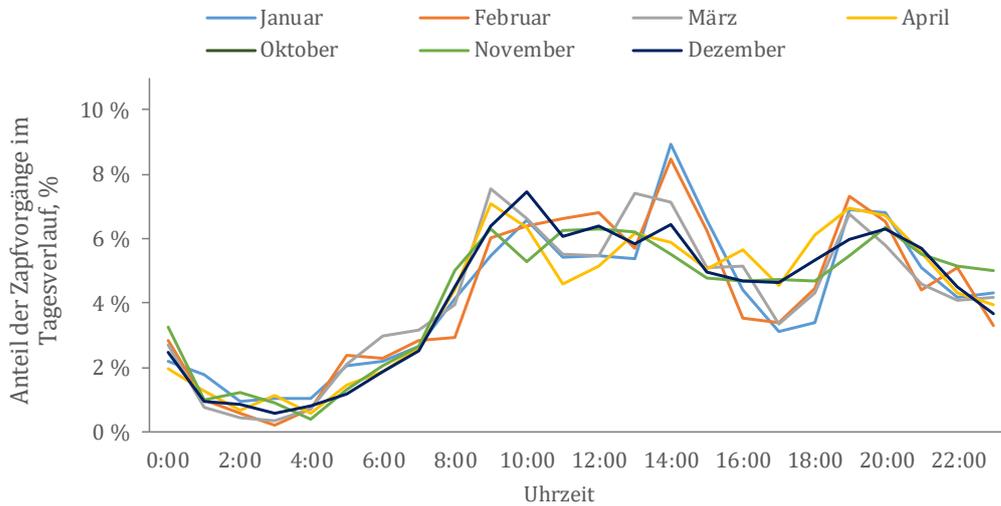


Abb. 6-48: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E2 pro Monat der Heizperiode 2012

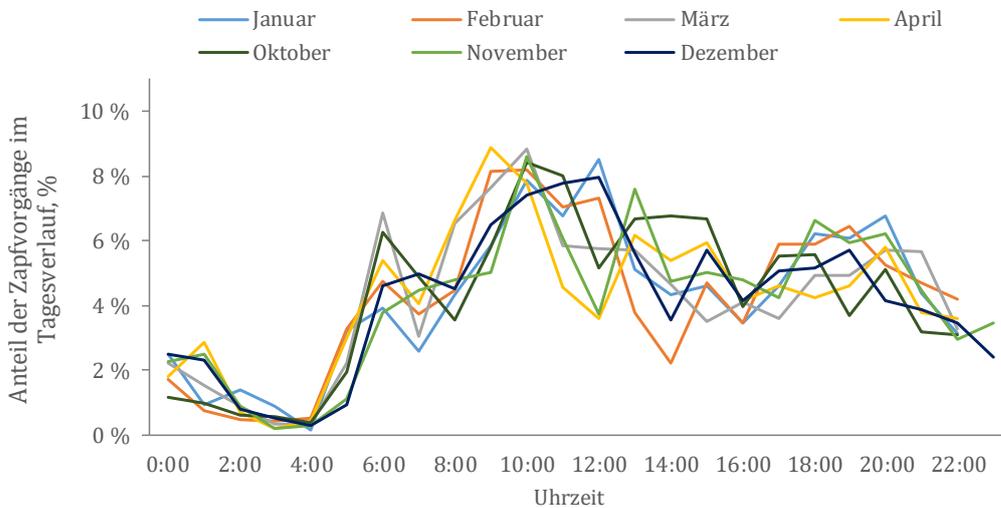


Abb. 6-49: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E3 pro Monat der Heizperiode 2012

Über die Befragung und die Daten des Zensus konnten drei Grundtypen von Haushalten festgestellt werden, diese teilen sich wie folgt auf: 38 % Ein-Personen-Haushalte, 26 % Paare ohne Kinder und 21 % Paare mit Kindern. Die Belegungsdichte einer Wohnung beträgt, bezugnehmend auf einen von der Stadt Karlsruhe erhobenen Wert, zwei Personen pro Wohnung (Amt für Stadtentwicklung Karlsruhe 2011). Diese Mieterstruktur führt zu den in *Abb. 6-50* dargestellten Zapfvorgängen im Tagesverlauf. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich kumuliert über alle Wohnungen der jeweiligen Sanierungsmaßnahme in der Heizperiode der prognostizierte Verlauf, wie in *Abb. 6-41* dargestellt, ergibt. Während der Nachtstunden finden keine bis nur wenige kurze Zapfvorgänge statt und tagsüber ein dem jeweiligen Lebensrhythmus angepasstes Verhalten, welches sich zu den Morgen- und Abendstunden dann entsprechend ausgeprägt darstellt (siehe *Abb. 6-50*).

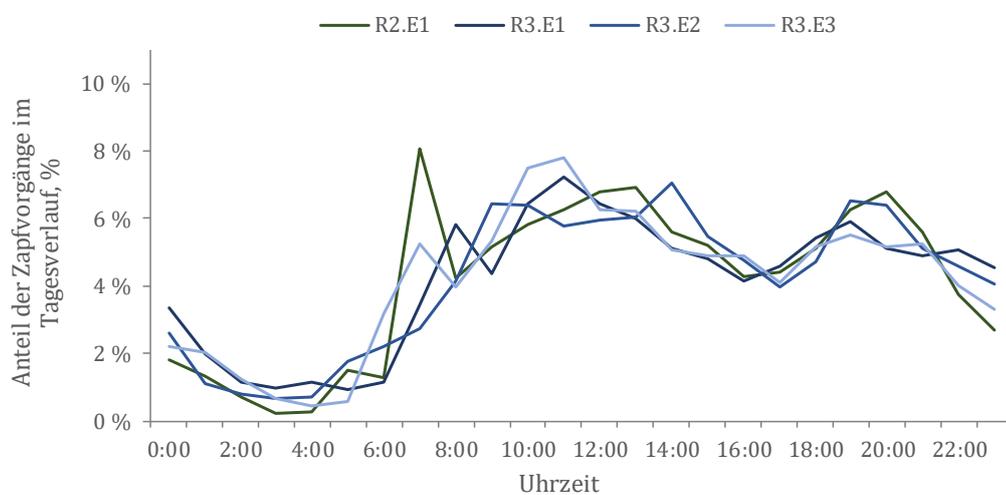


Abb. 6-50: Gegenüberstellung der einzelnen Sanierungsvarianten und deren Zapfverhalten über den Tag während der Heizperiode 2012

Auch im darauffolgenden Jahr 2013 (siehe *Abb. 13-57* bis *Abb. 13-65*) sind keine gravierenden Änderungen im Zapfverhalten der Nutzer ablesbar.

6.5.2 Gegenüberstellung des wohnungsweisen Energieverbrauchs im Jahresverlauf

In *Abb. 6-51* bis *Abb. 6-54* ist jeweils der Energieverbrauch für die Trinkwarmwassererzeugung pro Wohnung und Monat für das Jahr 2012 gegenübergestellt. Die Werte basieren auf Messdaten, die an der jeweiligen Wohnungsgrenze erhoben wurden. Nicht berücksichtigt sind daher die durch die Zirkulationsleitung entstehenden Verluste, sowie Speicherverluste im Keller.

Entsprechend dem jeweiligen Zapfprofil ergibt sich der wohnungsweise Energieverbrauch. Wohnungen mit einem höheren Zapfvorkommen wie bspw. R2.E1.W5 haben einen höheren Energieverbrauch als Wohnungen mit geringem Zapfvorkommen (z. B. R2.E1.W2). Für R2.E1.W5 bedeutet dies einen durchschnittlichen monatlichen Energieverbrauch von

1,75 kWh/m². R2.E1.W2 liegt mit einem Wert von 0,27 kWh/(m²Monat) knapp 85 % unterhalb des Wertes von R2.E1.W5. Diese Spreizung innerhalb eines Eingangs ist auch für die Wohnungen in R3 feststellbar. Über das Jahr schwankt der Energieverbrauch pro Wohnung zum einen aufgrund der Länge der jeweiligen Zapfvorgänge und zum anderen wegen der unterschiedlich bereitgestellten Trinkwassertemperaturen.

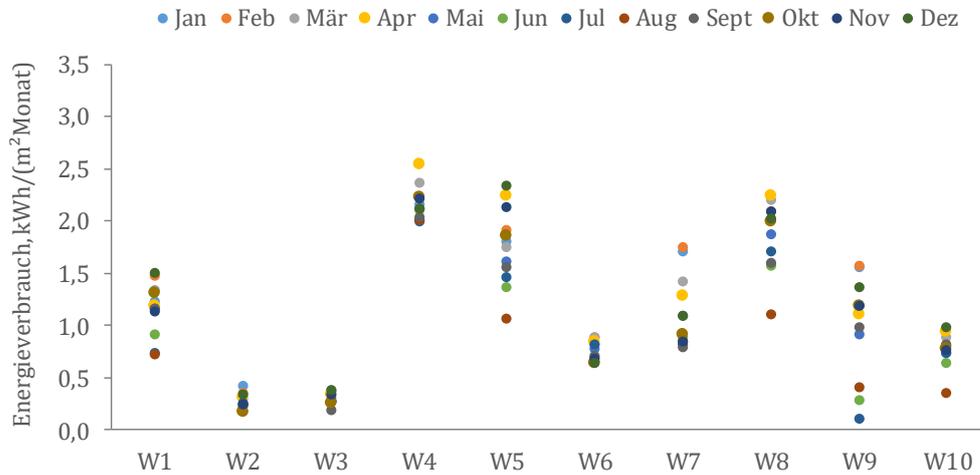


Abb. 6-51: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R2.E1 im Jahr 2012

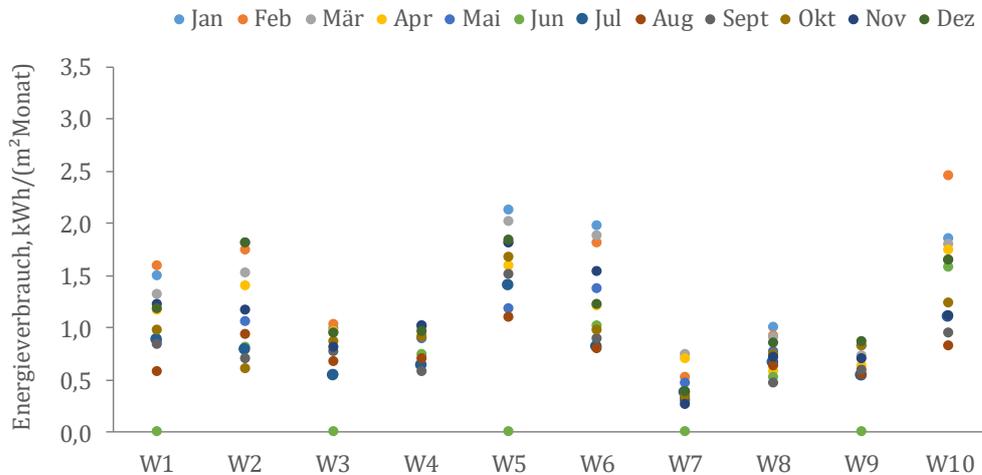


Abb. 6-52: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E1 im Jahr 2012

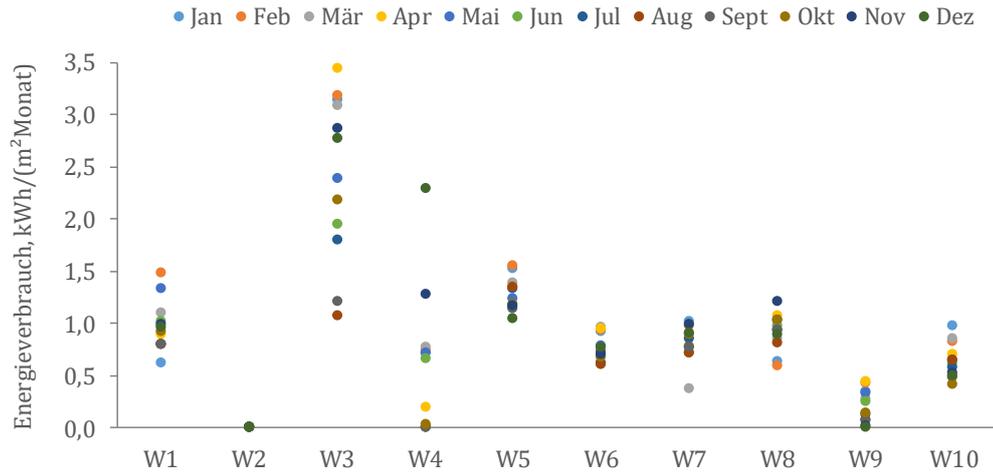


Abb. 6-53: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E2 im Jahr 2012

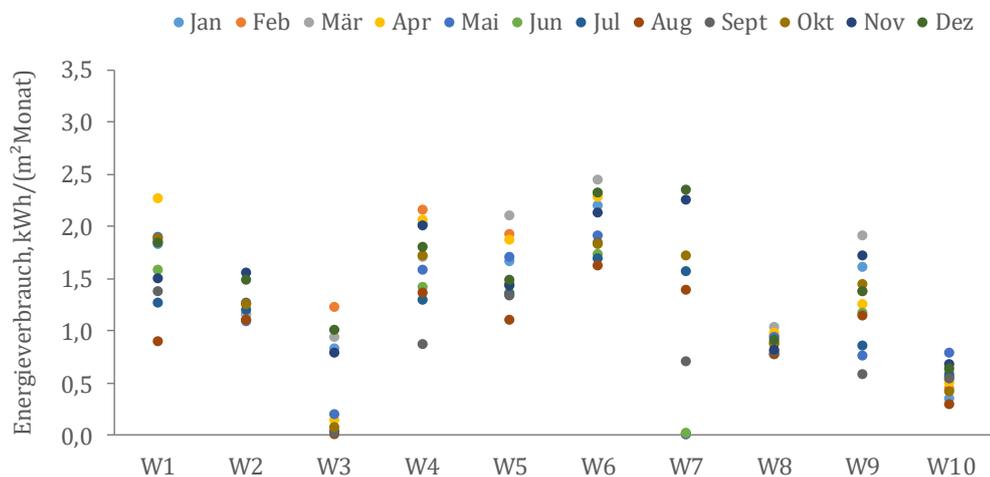


Abb. 6-54: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E3 im Jahr 2012

6.5.3 Vergleich des jährlichen Energieverbrauchs für die dezentrale Trinkwarmwassererzeugung

Der Energieverbrauch pro Person für die Trinkwarmwassererzeugung beläuft sich je nach Nutzerverhalten auf Werte zwischen 500 und 1.000 kWh pro Jahr. Statistiken zufolge liegt der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung je nach Nutzerverhalten ungefähr in der gleichen Größenordnung wie der Stromverbrauch (ASUE 2015). Der Normung folgend ist allerdings für die Energiebedarfsberechnung nach EnEV ein Wert von 12,5 kWh/(m²a) bzw. 13,9 kWh/(m²a) anzusetzen.

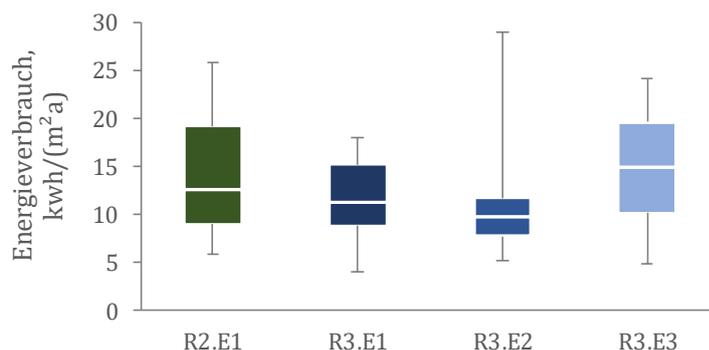


Abb. 6-55: Spannweite des Energieverbrauchs pro Eingang während 2012

In Abb. 6-55 sind die Spannweiten des Energieverbrauchs für die Trinkwarmwasserbereitung jeweils pro Sanierungsvariante für das Jahr 2012 gegenübergestellt. Für die einzelnen Eingänge lassen sich deutliche Unterschiede erkennen. Während der Energieverbrauch für die Trinkwarmwassererzeugung von R3.E2 nur in geringem Maße schwankt, lässt sich für den gleichen Betrachtungszeitraum für R2.E1 und R3.E3 eine deutlich ausgeprägtere Box feststellen. Allerdings können für R3.E2 die größten Ausreißer abgelesen werden. Der Median liegt für R2.E1 mit 12,6 kWh/(m²a) im Bereich der Normung. R3.E1 sowie R3.E2 unterschreiten den normativen Wert der DIN V 4701, wohingegen R3.E3 den Wert um knapp 20 % überschreitet. Über alle Eingänge betrachtet ergibt sich näherungsweise ein Wert von 12,2 kWh/(m²a), dem Bedarfswert nach Norm. Nach DIN V 18599 sind 13,9 kWh/(m²a) anzusetzen. Dieser Wert wird entsprechend von R2.E1, R3.E1 sowie R3.E2 im Mittel unterschritten und von R3.E3 um lediglich 8 % überschritten. Dieses recht eindeutige Bild verändert sich im Jahr 2013 deutlich (siehe Abb. 6-56).

Während für R2.E1 nahezu keine Veränderung im Energieverbrauch ablesbar ist, verschiebt sich die Spannweite für R3.E1 und R3.E2 deutlich. Bei Betrachtung des Medianes zeigt sich, dass R2.E1 und R3.E2 den normativen Wert nach DIN V 4701 einhalten. R3.E1 unterschreitet den Wert um knapp 20 %, wohingegen R3.E3 den Wert um 44 % überschreitet. Über das Jahr und alle Eingänge betrachtet wird die normative Vorgabe von 12,5 kWh/(m²a) um lediglich 6,4 % überschritten und respektive der Ansatz nach DIN V 18599 um 4,4 % unterschritten.

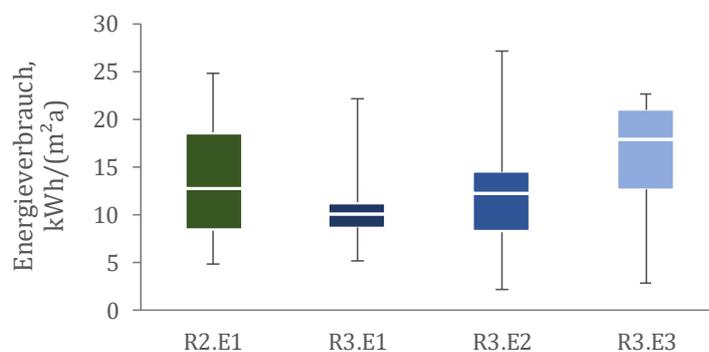


Abb. 6-56: Spannweite des Energieverbrauchs pro Eingang während 2013

6.5.4 Auswirkungen des ermittelten Energieverbrauchs für die Trinkwarmwassererzeugung auf die Energiebedarfsberechnung

Durch die Messdatenanalyse haben sich Spreizungen des Energieverbrauchs für die dezentrale Trinkwarmwassererzeugung im Bereich von 9 bis 20 kWh/(m²a) ergeben. In Abb. 6-57 ist der relative Endenergiemehrverbrauch für die einzelnen Sanierungsvarianten gegenübergestellt. In Abhängigkeit der verbauten Anlagentechnik ergeben sich unterschiedlich starke Ausprägungen im Endenergiemehrbedarf. Aufgrund der solarthermischen Anlage in R2.E3 sind hier die geringsten Mehrbedarfe trotz steigender Bedarfswerte ablesbar. Lediglich für die deutlichen Ausreiser, wie 20 kWh/(m²a), sind hohe Mehrbedarfswerte im Bereich von 15 % zu erkennen.

Eine Übereinstimmung von Endenergiebedarfs- und -verbrauchswerten ist auch unter Ansatz der gemessenen Verbrauchswerte in den Jahren 2012 und 2013 nicht feststellbar.

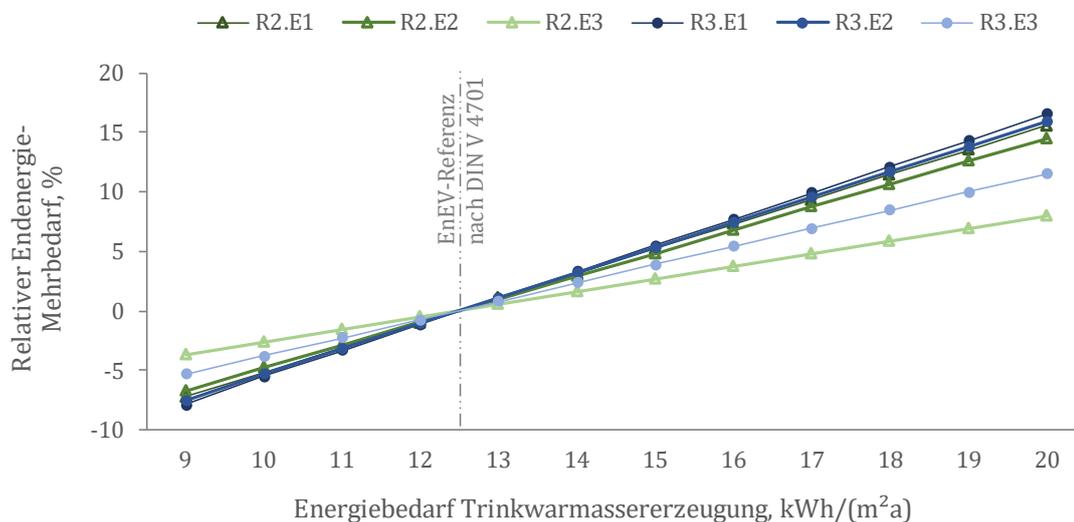


Abb. 6-57: Einfluss des Energiebedarfs für die Trinkwarmwassererzeugung auf den Endenergiebedarf

6.6 Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs unter Verwendung der gewonnenen Messdaten und der Verbrauchswerte

Wie bereits in früheren Untersuchungen gezeigt wurde (Erhorn 2007) und auch durch die vorliegende Messdatenanalyse bestätigt wird, weichen die Verbrauchswerte nach einer energetischen Sanierung von den im Vorfeld berechneten Bedarfswerten ab. Die Gründe dafür sind vielfältig und wurden in den Kapiteln 6.1 bis 6.5 intensiv analysiert.

Im Weiteren wird daher überprüft, in wie weit eine Übereinstimmung zwischen dem Heizwärmebedarf und Heizwärmeverbrauch erzielt werden kann, wenn das ermittelte Nutzerverhalten bei der Bedarfsermittlung Berücksichtigung findet. Für die Berechnung der Be-

darfswerte nach EnEV wird hierfür die ermittelte Verteilung der mittleren Eingangsinnentemperaturen, der internen Wärmegewinne sowie der Luftwechselrate angesetzt. In Tab. 6-6 und Tab. 6-7 sind die verwendeten Variablen pro Eingang für die Heizperioden 2012 und 2013 gegenübergestellt. Betrachtet werden jeweils das untere Quartil, der Median und das obere Quartil, um so eine gewisse Bandbreite des Nutzerverhaltens abzudecken. Es ergeben sich somit 27 Varianten pro Jahr und Eingang. Die sich ergebende Paretoverteilung ermöglicht die Darstellung der relativen Bedeutung verschiedener Elemente und deren absteigende Sortierung. Somit lassen sich die Kernelemente herausstellen.

Die Werte für den Energiebedarf der Trinkwarmwasserbereitstellung sind ebenfalls in den Tabellen aufgeführt. Allerdings wurde darauf verzichtet, diese Variablen anzuwenden, da dieser Wert nicht in die Heizwärmebedarfsberechnung, sondern lediglich in die End- und Primärenergieberechnung eingeht. Aufgrund der vorliegenden Messdaten ist hier ein Vergleich zwischen Bedarfs- und Verbrauchswerten nur je Riegel und nicht pro Eingang möglich.

Tab. 6-6: Verteilung der Parameter der Messdatenanalyse in der Heizperiode 2012

HP 2012	Lüftung, h ⁻¹						Temperaturen, °C					
	R2.E1	R2.E2*	R2.E3*	R3.E1	R3.E2	R3.E3*	R2.E1	R2.E2	R2.E3	R3.E1	R3.E2	R3.E3
Unteres Quartil	0,18	0,29	0,17	0,14	0,13	0,15	19,87	18,63	19,61	20,48	19,57	20,97
Median	0,34	0,44	0,24	0,24	0,25	0,19	21,50	21,99	21,86	22,45	22,03	22,65
Oberes Quartil	0,44	0,59	0,28	0,35	0,36	0,25	23,76	23,49	24,57	24,57	24,78	25,45
* inkl. erzwungenem Luftwechsel												
	Trinkwarmwasser, kWh/(m ² a)						Interne Gewinne, W/m ²					
	R2.E1	R2.E2	R2.E3	R3.E1	R3.E2	R3.E3	R2.E1 - R3.E3					
Unteres Quartil	9,05			8,88	7,78	10,14	7,81					
Median	12,60	Zentral		11,25	9,80	15,02	8,90					
Oberes Quartil	19,23			15,23	11,73	19,67	11,91					

Tab. 6-7: Verteilung der Parameter der Messdatenanalyse in der Heizperiode 2013

HP 2013	Lüftung, h ⁻¹						Temperaturen, °C					
	R2.E1	R2.E2*	R2.E3*	R3.E1	R3.E2	R3.E3*	R2.E1	R2.E2	R2.E3	R3.E1	R3.E2	R3.E3
Unteres Quartil	0,19	0,27	0,12	0,10	0,11	0,15	19,43	18,16	19,56	20,87	20,31	20,95
Median	0,31	0,42	0,19	0,22	0,25	0,22	20,93	21,01	22,16	22,96	23,22	22,82
Oberes Quartil	0,45	0,53	0,28	0,39	0,38	0,31	23,42	22,86	24,38	25,17	26,23	25,43
* inkl. erzwungenem Luftwechsel												
	Trinkwarmwasser, kWh/(m ² a)						Interne Gewinne, W/m ²					
	R2.E1	R2.E2	R2.E3	R3.E1	R3.E2	R3.E3	R2.E1 - R3.E3					
Unteres Quartil	8,41			8,72	8,28	12,72	7,81					
Median	12,75	Zentral		10,10	12,23	18,05	8,90					
Oberes Quartil	18,71			11,35	14,60	21,08	11,91					

In Abb. 6-58 sind die Ergebnisse der angepassten Bedarfsberechnung für die Jahre 2012 sowie 2013 der EnEV-Berechnung und den witterungsbereinigten Verbrauchsdaten der Jahre 2012 und 2013 gegenübergestellt. Aufgrund der rechnerischen Zusammenhänge bei der Ermittlung des Heizwärmebedarfs ergeben sich für alle Variantenkombinationen die geringsten Werte beim Ansatz der unteren Quartilswerte für den Luftwechsel und die Innentemperatur in Kombination mit dem oberen Quartilswert für die internen Gewinne, da diese als

Gutschrift betrachtet werden. Respektive ergibt sich der größte Heizwärmebedarfswert unter Berücksichtigung des oberen Quartilswertes für den Luftwechsel und die Innenraumtemperatur sowie des unteren Quartilswertes für die internen Gewinne. Dazwischen spannt sich das Feld der Varianten auf, welches sich entsprechend der unterschiedlichen Sanierungsvarianten bei der Umsetzung von einander unterscheidet.

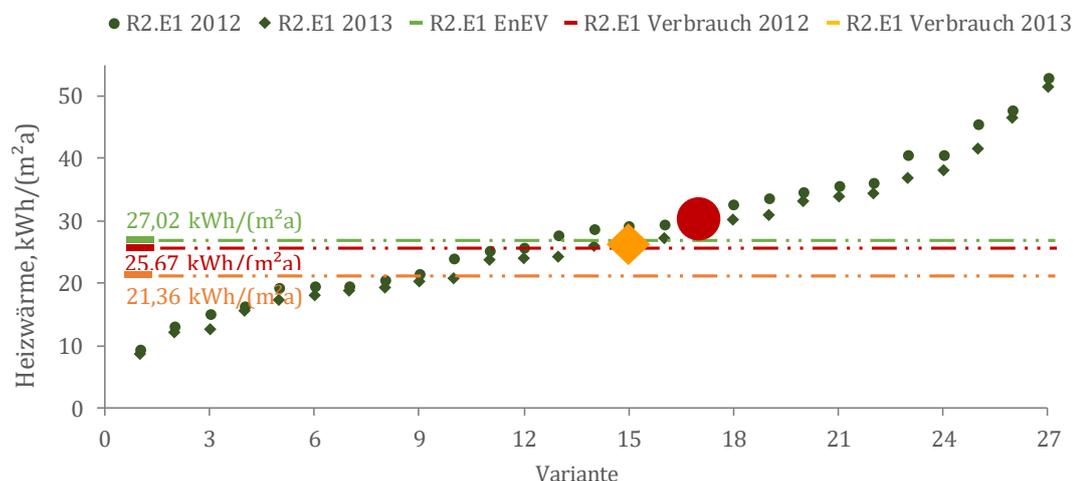


Abb. 6-58: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R2.E1

Im Fall von R2.E1 liegen bereits die witterungsbereinigten Verbrauchswerte unterhalb des normativ ermittelten Bedarfswertes. Bei der Berücksichtigung der individuellen Parameter liegen im Jahr 2012 12 Variantenkombinationen und in 2013 15 Variantenkombinationen unterhalb des Bedarfswertes der EnEV-Berechnung. In Bezug auf die gemessenen Verbrauchswerte ergibt sich im Jahr 2012 für 12 Variantenkombinationen und im Jahr 2013 für 10 Variantenkombinationen eine Unterschreitung der Verbrauchswerte. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass mehr als 50 % der möglichen Variantenkombinationen den Bedarf überschätzen.

In Abb. 6-58 sind ebenfalls die Bereiche – roter Kreis für 2012 und orangefarbenes Quadrat – unter Anwendung aller Medianwerte gekennzeichnet. Für das Jahr 2013 liegt dieser Wert im Bereich des EnEV-Bedarfs und oberhalb des gemessenen Verbrauchs. Der Wert für 2012 liegt etwas oberhalb des Bedarfswertes und überschreitet ebenfalls den gemessenen Verbrauchswert für das Jahr.

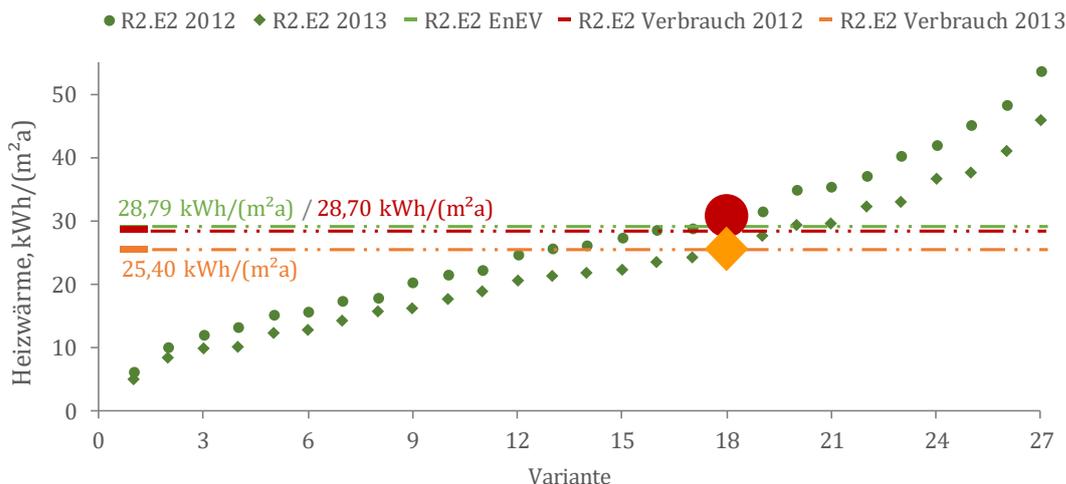


Abb. 6-59: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R2.E2

Für die Sanierungsvariante von R2.E2 kann ebenfalls eine gute Übereinstimmung des Bedarfswertes nach EnEV mit den Verbrauchswerten festgestellt werden, siehe Abb. 6-59. Dies zeigt sich im Speziellen dadurch, dass die für die Mediankombinationen (roter Kreis für 2012; orangefarbenes Quadrat für 2013) ermittelten Werte in unmittelbarer Nähe zum Bedarfswert nach EnEV, als auch den Verbrauchswerten liegen. Durch die Variation der Parameter überschreiten 16 Werte in 2012 den EnEV-Bedarfswert. Im Vergleich zu den Verbrauchswerten zeigt sich eine Überschreitung von 11 Kombinationen in 2012 und sechs Kombinationen in 2013.

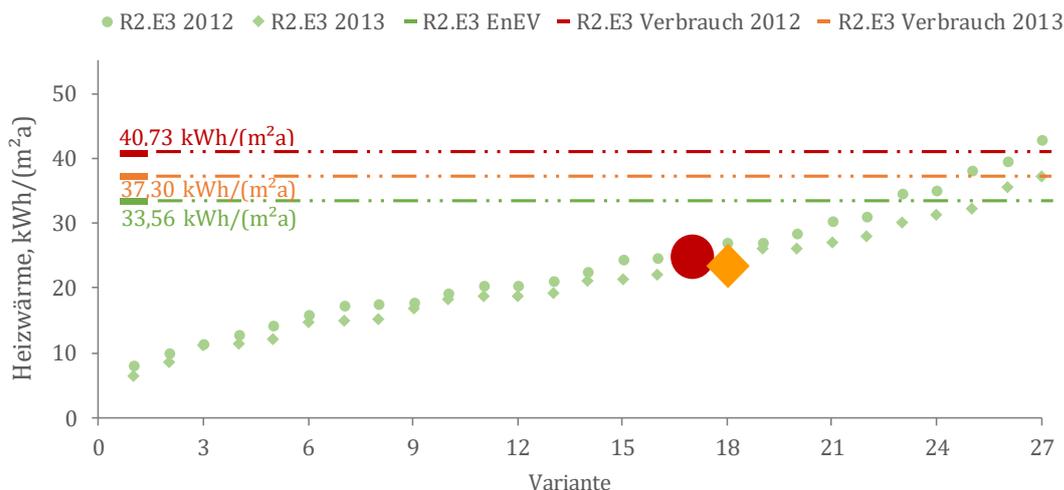


Abb. 6-60: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R2.E3

Bei der Sanierung von R2.E3 handelt es sich um eine Variante bei der der im Vorfeld berechnete Bedarfswert nach EnEV in den Jahren 2012 und 2013 nicht eingehalten wird. Während im ersten Jahr nach Einzug noch eine Überschreitung von 20 % vorliegt, reduziert sich dieser Wert im Folgejahr auf 11 %. Die Kurven der Parametervariation für die Jahre 2012 und 2013 verlaufen ähnlich wie bei R2.E1, nur weniger steil (siehe *Abb. 6-60*).

Die Variation der Parameter führt im Jahr 2012 dazu, dass fünf und im Jahr 2013 zwei Parameterkombinationen den EnEV-Bedarfswert überschreiten. Im Vergleich mit den Verbrauchswerten liegt im Jahr 2012 nur eine Parameterkombination und in 2013 kein Wert über dem jeweiligen Verbrauch. Die Berechnung unter Verwendung aller Medianwerte (rote und gelbe Markierung) führen zu Ergebnissen, die sowohl den EnEV-Bedarfswert als auch die Verbrauchswerte deutlich unterschreiten.

In *Abb. 6-61* sind die Ergebnisse der Parametervariationen für R3.E1 in den Jahren 2012 und 2013 dem Bedarfswert nach EnEV und den Verbrauchswerten gegenübergestellt. Aufgrund der verbauten Lüftungsanlage mit WRG liegt hier ein geringerer Bedarfswert als in den anderen Sanierungsvarianten vor.

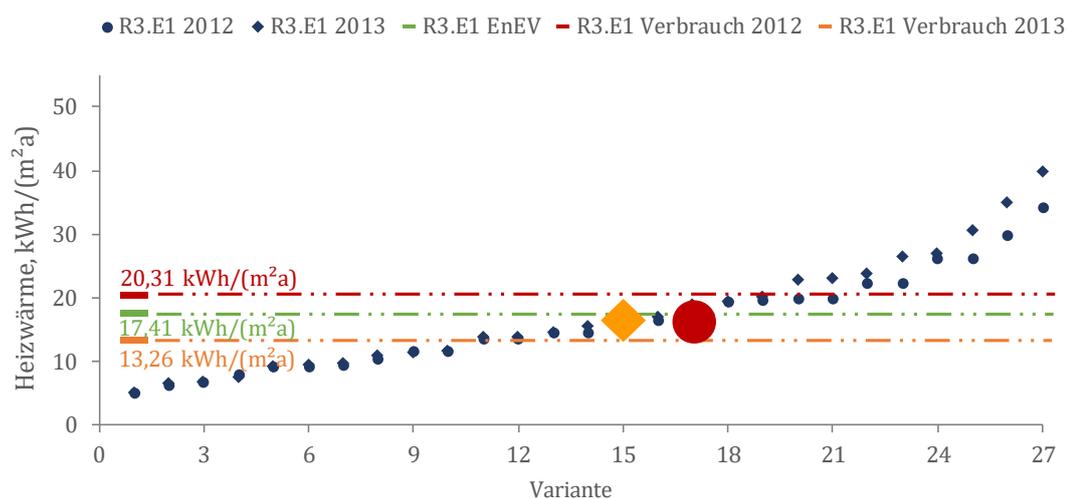


Abb. 6-61: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R3.E1

Im ersten Jahr konnte dieser Bedarfswert nicht erzielt werden, aber im Folgejahr wurde dieser sogar um 24 % unterschritten. Für die unterschiedlichen Parametervariationen ergibt sich ein Bild wie für R2.E1. Im Jahr 2012 überschreiten zehn Parametervariationen den Bedarfswert nach EnEV und im Jahr 2013 11. In Bezug auf die gemessenen Verbrauchswerte liegen im Jahr 2012 sechs und im Jahr 2013 sogar 17 Parametervariationen über dem jeweiligen Verbrauch. Die Maßnahmenkombination alle drei Medianwerte (siehe Markierung in orange und rot) zeigt in beiden Jahren eine gute Übereinstimmung mit dem Bedarfswert nach EnEV.

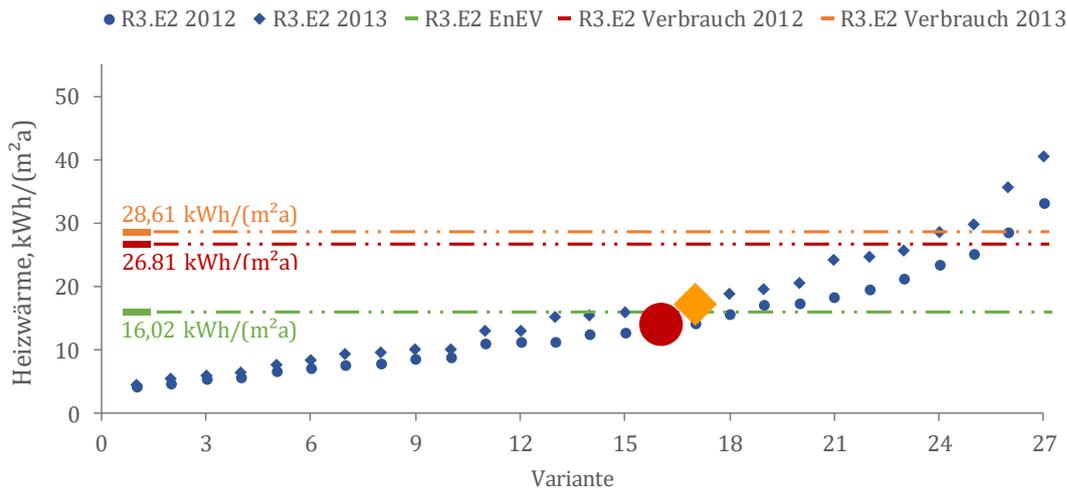


Abb. 6-62: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R3.E2

Auch bei der Sanierung von R3.E2 wurde eine Lüftungsanlage mit WRG verbaut. Der geringe Bedarfswert nach EnEV kann weder im Jahr 2012 mit 67 % Überschreitung, noch im Folgejahr 2013 mit 79 % Überschreitung erreicht werden. Es zeigt sich jedoch, dass der unter Verwendung der Medianwerte für Innenraumtemperatur, interne Gewinne und Luftwechsel (roter Kreis für 2012, orangefarbenes Quadrat für 2013) berechnete Bedarfswert gut mit dem Bedarfswert nach EnEV übereinstimmt.

Wie Abb. 6-62 zu entnehmen ist, verlaufen die Kurven für die Parametervariationen ähnlich wie bei R3.E1, wobei ein deutlicherer Unterschied zwischen den beiden Betrachtungsjahren zu verzeichnen ist. Im Jahr 2012 überschreiten neun und im Jahr 2013 12 Parametervariationen den EnEV-Bedarfswert. Im Vergleich mit den Verbrauchswerten ergibt sich in beiden Jahren eine deutliche Unterschreitung der Werte.

Bei der Sanierungsvariante von R3.E3 wird der EnEV-Bedarfswert in beiden Jahren unterschritten. Die Kurven für die Parametervariationen verlaufen ähnlich wie bei R2.E3, siehe Abb. 6-63. In Bezug auf die Variation der nutzerspezifischen Parameter bei der EnEV-Berechnung ergibt sich im Jahr 2012 für fünf und im Jahr 2013 für sechs Variationen eine Überschreitung des EnEV-Bedarfswertes. Im Vergleich mit den jährlich gemessenen Verbrauchswerten lässt sich im Jahr 2012 für sieben und im Jahr 2013 für zehn Parametervariationen eine Überschreitung feststellen.

Der rote Kreis (2012) und das orangefarbene Quadrat (2013) geben den Bereich des Bedarfswertes unter Verwendung der drei Medianwerte an (siehe Abb. 6-63). Es zeigt sich, dass der Bedarfswert nach EnEV deutlich unterschritten wird. Im Gegensatz dazu ist eine relativ gute Übereinstimmung der Medianbedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchsdaten feststellbar.

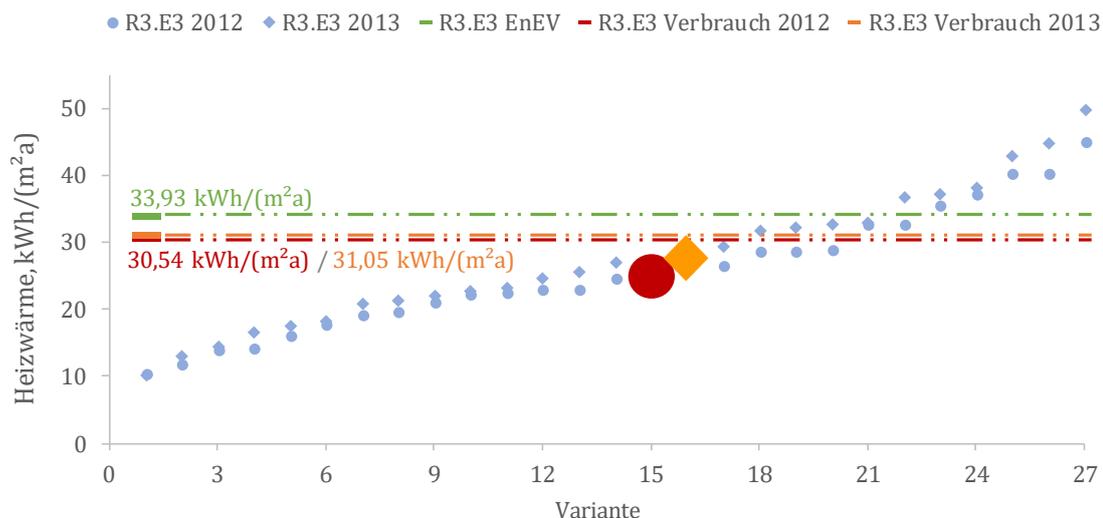


Abb. 6-63: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R3.E3

Die Gegenüberstellung der EnEV-Berechnungen unter Zuhilfenahme der gemessenen Parameter, der Standard-EnEV-Berechnung sowie der witterungsbereinigten Verbrauchswerte hat gezeigt, dass durchaus gute Übereinstimmungen zwischen den Bedarfs- und Verbrauchswerten erzielt werden kann, obwohl dies aufgrund der großen Bandbreite der Parameter nicht den Anschein hatte. Die Analysen zeigen, dass bei vier von sechs Sanierungsvarianten eine gute Übereinstimmung zwischen dem Bedarfswert nach EnEV und unter Berücksichtigung der Medianwerte (roter Kreis, orangefarbenes Quadrat) vorhanden ist, außer für R2.E3 und R3.E3.

Zwar haben die Mieter den Wunsch nach erhöhten Innenraumtemperaturen – Median zwischen 21 ° und 23 °C – was zu einem erhöhten Verbrauch führen muss, aber gleichzeitig reduzieren sie die Lüftungswärmeverluste. Die Medianwerte liegen zwischen 0,19 und 0,44 h⁻¹ und unterschreiten somit den Ansatz der Normung mit 0,55 h⁻¹. In Kombination führt dies dazu, dass der Bedarf nicht im Maß der gestiegenen Innenraumtemperatur ansteigt. Des Weiteren führen die gegenüber der Norm erhöhten internen Gewinne dazu, dass der Verbrauch nicht gemäß der Innentemperatur ansteigt. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die gestiegenen Anforderungen an die Innenraumtemperatur und damit einhergehend eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs durch ein angepasstes Lüftungsverhalten und die Nutzbarmachung der internen Gewinne kompensiert werden kann. Dies trifft allerdings nur für die Betrachtung eines ganzen Eingangs zu. Für die einzelnen Wohnungen sind weiterhin deutliche Abweichungen zwischen dem Heizwärmebedarf- und Verbrauch feststellbar.

In der Praxis sollte daher bei der Berechnung der Energie-Bedarfswerte für kleinere Gebäude mit wenigen Nutzern abgewägt werden, ob die Berechnung nicht eher mit nutzerspezifischen Parametern durchgeführt wird, um somit eine bessere Voraussage des tatsächlichen Verbrauchs zu erzielen. Für größere Mehrfamilienhäuser mit einer Durchmischung der Haushaltstypen scheint sich das Nutzerverhalten in Bezug auf die Parameter – Innentemperatur, interne Gewinne und Luftwechsel – gut auszugleichen. Was nicht unweigerlich dazu führt, dass dies für den einzelnen Nutzer zutreffend ist.

7 Fazit

Öffentliche und private Gebäude in Deutschland verbuchen für Heizung, Warmwasser und Beleuchtung einen Anteil von 40 % des Gesamtenergieverbrauchs und stehen somit für fast 20 % des gesamten CO₂-Ausstoßes (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2014). Von 19 Millionen Wohngebäuden stammen knapp 12 Millionen aus der Zeit, in der die erste Wärmeschutzverordnung – seit 2002 Energieeinsparverordnung EnEV – noch nicht in Kraft bzw. energieeffizientes Bauen ebenfalls ein Fremdwort war (BMWi 2016). Durch die energetische Ertüchtigung der wärmeübertragenden Umfassungsflächen und den Einbau moderner Gebäudetechnik können teilweise bis zu 80 % des Energiebedarfs eingespart werden. Diese Einsparpotentiale zu nutzen und gleichzeitig optimale Ergebnisse zu erzielen, ist nicht nur eine Frage der Technik, sondern des bewussten Wohnverhaltens. Aber die Gründe für das Energieverbrauchsverhalten – sparsam oder verschwenderisch – von privaten Haushalten sind komplex und differenziert.

Von einer energetischen Sanierung und der einhergehenden Effizienzsteigerung erwarten sich Gebäudebesitzer und Nutzer eine konkrete Einsparung von Energie- und Heizkosten. In der Praxis, wie auch bei der vorliegenden Analyse, hat sich gezeigt, dass die Einsparziele nicht erreicht werden konnten. Zum einen liegt dies daran, dass die im Vorfeld prognostizierten Einsparberechnungen auf Basis der Bedarfswerte des Bestandsgebäudes getätigt wurden (Prebound-Effekt), was in diesem Fall eine Abweichung von mehr als 30 % ausmacht. Zum anderen konnte ein von den normativen Parametern der EnEV abweichendes Nutzerverhalten, als auch anlagentechnische Mängel festgestellt werden, was letztendlich zum Auftreten einer Performancelücke geführt hat (siehe *Abb. 7-1*).

Bei der Analyse sind daher zwei Bereiche voneinander zu unterscheiden; zum einen die gebäude- und zum anderen die nutzerspezifischen Faktoren. Zu den gebäudespezifischen Faktoren zählen unter anderem die bauphysikalische und anlagentechnische Beschaffenheit, sowie die Lage der Wohnung im Gebäude. Zu den Nutzereinflüssen ist nicht nur das Handeln der Personen zu zählen, sondern auch die Belegungsdichte (z. B. Familie oder Singlehaushalt) und Belegungsdauer (bspw. nicht berufstätig oder berufstätig) und nicht zuletzt die aktuelle Lebenssituation. Dabei entstehen deutliche Unterschiede im Heizwärmeverbrauch zwischen den einzelnen Nutzerhaushalten, was sich in der großen Varianzbreite darstellt.

Während in unsanierten Gebäuden die Möglichkeiten zur Energieeinsparung mittels eines angepassten Nutzerverhaltens durch die bauphysikalischen und anlagentechnischen Gegebenheiten eingeschränkt sind, bekommt das Heiz- und Lüftungsverhalten sowie der Trinkwarmwasserbedarf in einem energetisch optimierten Gebäude einen großen Stellenwert. Um diese Potentiale auszuschöpfen, müssen die Nutzer die Möglichkeit eines ressourcenschonenden Verbrauchsverhaltens erkennen, welches durch individuelle Komfortansprüche und Wissensstände geprägt ist.

Im vorliegenden Fall haben sowohl die Messdatenanalyse als auch die Nutzerbefragung aufgezeigt, dass sehr unterschiedliche Ansprüche an die als behaglich empfundenen Raumtemperaturen bestehen. Die individuelle Wohlfühltemperatur variiert sowohl in Abhängigkeit

der Zimmernutzung, aber auch zwischen den einzelnen Bewohnern einer Wohnung. Für das Badezimmer kann erwartungsgemäß die höchste Raumtemperatur gemessen werden; aber auch in den Wohnzimmern der einzelnen Sanierungsvarianten ergeben sich während der betrachteten Heizperioden im Mittel Temperaturen zwischen 21 und 23,2 °C. Für die restlichen Räume der Wohnungen – Kind und Schlafen – konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die eingestellten Temperaturen nicht markant von den Wohnzimmertemperaturen abweichen, die im Durchschnitt bei Werten um 22 °C liegen. Dies führt abschließend dazu, dass die gemessenen Wohnungstemperaturen von den normativen Ansätzen (19/20 °C) abweichen. Eine Steigerung der Wohnungstemperatur um 1 K führt im vorliegenden Fall zu einem Anstieg des Heizwärmebedarfs von bis zu 16 % je nach Sanierungsvariante.

Im Bereich des Lüftungsverhaltens zeigen sich ebenfalls unterschiedliche Komfortvorstellungen der einzelnen Nutzer. Die Ergebnisse der Messdatenanalyse zeigen, dass in allen Wohnungen durchschnittlich eine gute Raumluftqualität vorherrschend ist. CO₂-Werte oberhalb von 2.000 ppm können lediglich zu geringen Zeitanteilen festgestellt werden. Die Fenster werden bei geringen Außentemperaturen unter 0 °C eher kürzer geöffnet, als bei Temperaturen über 0 °C. Dieses Verhalten ist gleichermaßen für alle Räume zutreffend. Im Wohnzimmer herrscht zudem eher die Stoßlüftung vor, während in der Küche und im Badezimmer die Fenster häufig länger geöffnet sind, was wiederum auf eine Kipp-Öffnung schließen lässt. In allen hier untersuchten Wohnungen ist mindestens eine Zwangslüftung (Fensterüberströmer), wenn nicht sogar eine maschinelle Lüftung, verbaut. Die Befragung hat gezeigt, dass sich die Zwangslüftung als auch die maschinelle Lüftung keiner großen Akzeptanz erfreut. Lüftungsanlagen werden nicht oder falsch verwendet und die Überströmöffnungen im Fensterbereich aufgrund von empfundenen Zugscheinungen in einzelnen Fällen abgeklebt. Dies führt letztendlich dazu, dass bei der wohnungs- bzw. eingangsweisen Betrachtung der Messdaten keine großen Unterschiede im Lüftungsverhalten zwischen den Sanierungsvarianten mit und ohne maschinelle Lüftung festgestellt werden können. Im Mittel ergeben sich Fensterluftwechselraten von 0,19 bis 0,44 h⁻¹, wobei je nach Eingang ein ergänzender Luftwechsel für die masch. Lüftungsanlage zu berücksichtigen ist. Es bleibt festzuhalten, dass der Wert von 0,44 h⁻¹ für eine Sanierungsvariante mit Zwangslüftung im Bereich (20 % Abweichung) der normativen Vorgaben von 0,55 h⁻¹ liegt.

In den letzten 30 Jahren hat der zunehmende Wohlstand und Konsum zu einem einmaligen Anstieg des Ausstattungsgrades geführt (Umweltbundesamt 2007). Diese Energiedienstleistungen ermöglichen eine effiziente Alltagsorganisation und sind somit fest in das tägliche Leben integriert (Fischer 2008). Neueste Zahlen des statistischen Bundesamtes belegen, dass die Ausstattung der Haushalte mit Unterhaltungs-, Informations- und Kommunikationstechnik beständig zunimmt. Zuwächse im Bereich der Haushaltsgeräte sind ebenfalls zu verzeichnen. Zwar reduziert sich der Energieverbrauch durch die Geräteeffizienz kontinuierlich, allerdings wird diese Einsparung durch die Vielzahl der Geräte wieder zu Nichte gemacht (Rebound-Effekt). In Kombination mit der vorliegenden Mieterstruktur ergeben sich vielfältige Ansätze für die internen Gewinne. Diese reichen von einem berufstätigen Ein-Personen-Haushalt mit einem Wert von 4,7 W/m² bis hin zu einem Zwei-Personen-Haushalt mit Kind nicht berufstätig und einem Wert von 13,7 W/m². Im Mittel ergibt

sich für die im Betrachtungsgebiet vorzufindende Mieterstruktur ein Wert von $8,9 \text{ W/m}^2$ für die internen Gewinne. Dieser liegt deutlich über dem normativen Ansatz von 5 W/m^2 . Ob die internen Gewinne im Heizfall tatsächlich zu einer Reduzierung des Wärmeverbrauchs und nicht zu erhöhtem Lüftungsverhalten führen, kann hier nicht abschließend geklärt werden.

Durch die energetische Modernisierung des Bestandsgebäudes reduziert sich der Gesamt-wärmeverbrauch. Dies ist vor allem auf die bauphysikalische Ertüchtigung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche zurückzuführen. Der Energiebedarf für die Erwärmung des Trinkwarmwassers ist davon unabhängig und wird nach Norm mit $12,5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ angesetzt. Daraus folgt, dass der relative Anteil der Trinkwassererwärmung am Gesamtenergieverbrauch mit zunehmender energetischer Qualität steigt. In einem Altbau bspw. beträgt der Trinkwarmwasserenergieanteil ca. 10 %; dieser wächst bei energieeffizienten Gebäuden auf bis zu 45 % an (Felsmann und Schmidt 2013). Demzufolge kommt dem Energieverbrauch zur Trinkwarmwassererzeugung und den dadurch entstehenden Kosten in Zukunft eine größere Bedeutung zuteil. Die vorliegenden Messdaten zeigen, dass sich der Energieverbrauch für das Trinkwarmwasser der einzelnen Wohnungen in einem Eingang mit gleicher Anlagentechnik deutlich voneinander unterscheidet. Es sind Abweichungen von bis zu 100 % zwischen zwei Wohnungen eines Eingangs ablesbar. Dies liegt zum einen mitunter an der Lebenssituation, aber auch an den jeweiligen Vorlieben in der Häufigkeit von Dusch- oder Badevorgängen. Über zehn Wohnungen kumuliert, stellen sich in den beiden betrachteten Jahren für einzelne Sanierungsvarianten mittlere Energieverbrauchswerte im Bereich von $12,0$ bzw. $12,5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ ein. Was wiederum eine Übereinstimmung mit den normativen Vorgaben mit sich bringt.

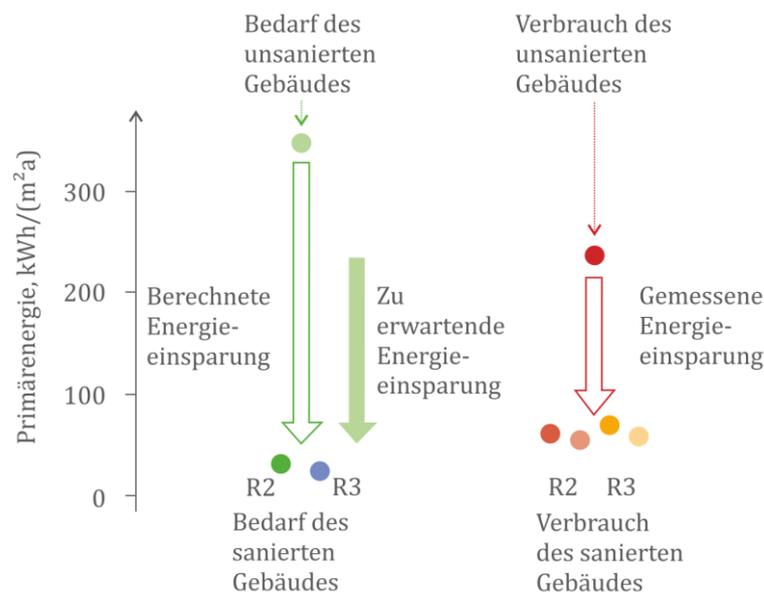


Abb. 7-1: Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs und gemessenen Primärenergieverbrauchs vor und nach der energetischen Sanierung für Riegel R2 und R3

Die Analyse der Messdaten sowie die Befragung haben gezeigt, dass das Energienutzungsverhalten der jeweiligen Bewohner während der Heizperiode gewohnheitsmäßig nach einer wiederholten Routine abläuft. Eine Verhaltensänderung gestaltet sich daher schwierig und bedarf einer Bewusstmachung des Energieverbrauchsverhaltens bspw. durch Wirksamkeits- oder Kosten-Nutzen-Überzeugungen. Unter einer Wirksamkeitsüberzeugung kann im vorliegenden Fall die Bewusstmachung der Kipplüftung im Winter und die Folgen der Auskühlung der Wohnung ohne optimalen Luftwechsel verstanden werden. Nach einer breit angelegten Befragung der einzelnen Bewohner, sowie begleitenden Nutzerinformativabenden, konnten im darauffolgenden Jahr Änderungen im Nutzerverhalten, sowie damit einhergehende Energieeinsparungen verzeichnet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die energetische Sanierung der Bestandsgebäude knapp 70 % Primärenergie eingespart werden konnte (siehe *Abb. 7-1*). Aufgrund der erhöhten Innenraumtemperaturen ergibt sich rechnerisch ein deutlicher höherer Heizwärmebedarf, was wiederum zu einem schlechteren Wirkungsgrad der Anlagentechnik führen kann. Durch die Nutzbarmachung der angestiegenen internen Gewinne konnte ein Teil der Heizwärme erbracht werden. Hinzu kommt, dass die Nutzer weniger gelüftet haben als die Normung ansetzt, und trotzdem nur geringe Zeiten mit CO₂-Wert über 1.000 ppm feststellbar sind. Das geänderte Lüftungsverhalten führt zu einer Reduktion der Lüftungswärmeverluste.

Allerdings wurde nicht das ganze rechnerische Einsparpotential erschlossen. Dies liegt zum einen am Nutzerverhalten, aber auch an den festgestellten anlagen- und installationstechnischen Mängeln. Zur vollständigen Erreichung der Energiesparziele ist es daher notwendig, alle Akteure einzubeziehen. Nur wenn sich die Menschen, die in einem energieeffizienten Gebäude wohnen, in diesem Haus wohlfühlen und mit der Technik zurechtkommen, kann die Energieeffizienz der Gebäude vollständig ausgeschöpft werden. Auf der anderen Seite kann ergänzend angeregt werden, die normativen Parameter, die das Nutzerverhalten in der Bedarfsberechnung widerspiegeln, zu überdenken und zwar auf der Basis der hier gewonnenen Erkenntnisse sowie der bereits in der jüngsten Vergangenheit durch Publikationen und Forschungsberichte veröffentlichten Thesen. Beide Wege gemeinsam können in Zukunft zu einer Reduzierung der Performancelücke und damit zur Erreichung der Energie- und CO₂-Einsparziele der Bundesregierung beitragen.

8 Ausblick

Die fortschreitende Klimaveränderung stellt eine Herausforderung für die Zukunft dar. Die energetischen Anforderungen an die Gebäude werden weiter verschärft. Ab 2021 dürfen in der EU nur noch Fast-Nullenergiehäuser gebaut werden. Der energieeffiziente Neubau ändert wenig am Energieverbrauch in Deutschland; die Sanierung des großen Gebäudebestandes ist die wichtigste Aufgabe in den nächsten Jahren. Energie intelligent und effizient zu nutzen sowie gleichzeitig den Verbrauch zu reduzieren ist dabei der größte Hebel. Der sinnvolle Einsatz erneuerbarer Energien, energieeffizientes Bauen und Sanieren sind für die Bewältigung des Klimawandels zwingend erforderlich. Lokal erzeugte erneuerbare Energien aus Wasser, Wind, Sonne oder Biomasse dienen dabei der Versorgung der Gebäude der Zukunft.

Für die energieeffizienten Gebäude der Zukunft und die damit einhergehenden Ziele ist es daher notwendig, neue Konzepte zur Beratung und Sensibilisierung von Gebäudeeigentümern und -nutzern zu entwickeln. Ein Konzept kann dahingehend sein, eine weitreichendere Energieberatung zu fordern, die aus drei Phasen besteht: der Konzeptionierung, Begleitung der Umsetzung und Überprüfung der Maßnahme im Betrieb.

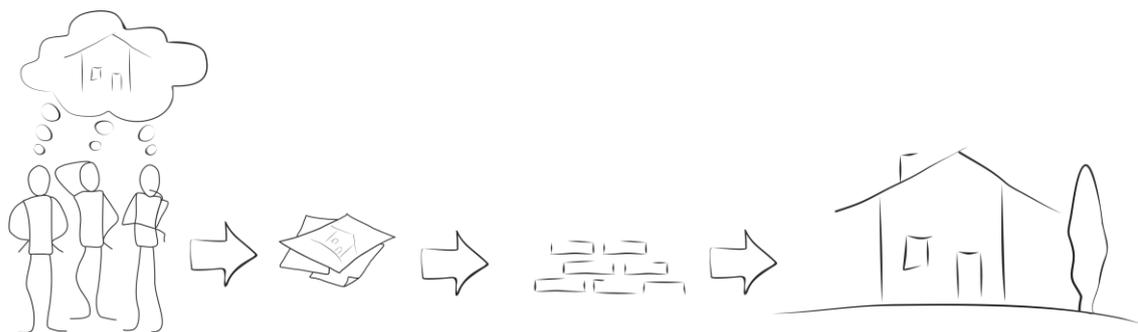


Abb. 8-1: Konzept zur dreistufigen Energieberatung

Das Maßnahmenkonzept umfasst dabei sowohl die gebäude- und anlagenspezifischen Gegebenheit als auch die nutzerspezifischen Parameter und deren Analyse. Im Zuge dessen sind neben dem öffentlich-rechtlich geforderten Nachweis die Bedarfsberechnungen auf Basis der individuellen Parameter als auch für die entsprechenden Klimabedingungen zu erstellen. Die geplante Anlagentechnik sollte dabei so ausgelegt werden, dass sowohl die Technik als solches, als auch die Bedienelemente so konzipiert werden, dass sie für die Betreiber und Nutzer intuitiv zu verwenden ist.

Im Zuge der Energieberatung ist als zweites Element die Baubegleitung zu nennen. Durch die Begleitung der Maßnahme während des Umsetzungsprozesses können Mängel frühzeitig erkannt werden. Dies betrifft sowohl die baukonstruktive, bauphysikalische als auch die anlagentechnische Ausführung.

Als drittes und letztes Element ist die Überwachung des Gebäudes im Betrieb zu nennen. Hierunter ist sowohl die Nutzersensibilisierung und -information in Bezug auf das richtige

Lüftungsverhalten bspw. mit einer maschinellen Lüftungsanlage, die Bedienung der Heizungs- und Lüftungsanlage oder die Wahl von geeigneten Raumtemperaturen zu verstehen. Des Weiteren gehört aber auch eine kontinuierliche Überprüfung der Verbrauchswerte sowie der Abgleich mit den Bedarfswerten zu den Aufgaben.

Das vorgestellte Konzept wird in Ansätzen bereits seitens der dena, KfW sowie bafa ange-regt bzw. gefordert.

Die Möglichkeit, den Komfort für jeden Raum individuell zu regeln, stellt den bestmöglichen Energieverbrauch der Gebäude sicher. Flexible Tarife fordern und fördern das bewusste Energieverbrauchsverhalten der Nutzer, die konsequente Vernetzung und Kopplung von Erzeugung sowie Verbrauch. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlagen ist dabei selbstver-ständlich. Mit Transparenz über das Verbrauchsverhalten haben Mieter und Eigentümer den Verbrauch und die dadurch entstehenden Kosten jederzeit im Blick – im besten Fall separat für jeden Raum. Das Kosten- und Umweltbewusstsein bei allen Beteiligten steigt. Nutzer können ihr Verbrauchsverhalten aktiv gestalten.

Neben der Beratung und Nutzeraufklärung kann zukünftig durch ein modernes Energiema-nagement mittels intelligenter, automatisierter Mechanismen nutzerspezifisches Ver-brauchsverhalten erfasst und daraus entweder ein Verbrauchsportal für den Mieter oder sogar eine energieeffiziente Verbrauchssteuerung nach "Best Practice" abgeleitet werden. Die Ausführungsmöglichkeit richtet sich dabei nach den technischen Möglichkeiten des Ge-bäudes sowie der verbauten Anlagentechnik und Gebäudeautomation.

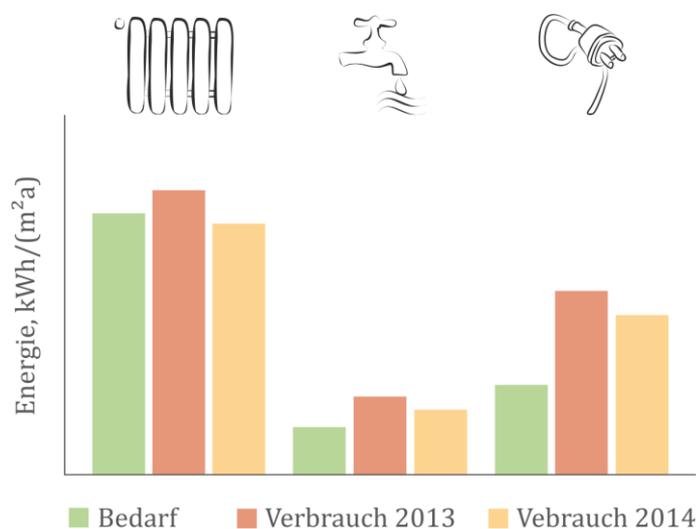


Abb. 8-2: Beispielhafte Darstellung eines Verbrauchsportals

Im Zuge eines Verbrauchsportals werden dem Mieter sowohl der jeweilige Verbrauch für den Bereich Heizung, Trinkwarmwasser und Strom als auch der normativ ermittelte Bedarf für die jeweiligen Bereiche angezeigt. Des Weiteren kann nach einem Messintervall von bspw. einem Jahr dazu übergegangen werden zusätzlich die einzelnen witterungsbereinigten Verbräuche gegenüberzustellen, um so dem Mieter die Möglichkeit zu geben sein Ver-

brauchsverhalten einzuschätzen. Als zusätzlicher Ansporn könnten ebenfalls die Verbrauchsdaten benachbarter Mieter (bei gleicher Wohnungsgröße) anonymisiert angezeigt werden, um somit für zusätzliche Motivation zu sorgen.

Die zweite Möglichkeit, eine energieeffiziente Verbrauchssteuerung nach "Best Practice", basiert auf der Analyse von Gebäude- und Umgebungsfaktoren sowie Energieverbrauchs- und Nutzungsinformationen sowie der Extraktion von nutzungsspezifischen Verbrauchs-, Zeit- und Ereignis-Relationen. Das heißt, dass das System die Nutzereigenschaften des jeweiligen Bewohners erlernen muss und dafür sorgt, dass die Räume bzw. die Wohnung energieeffizient betrieben werden. Ändert der Mieter sein Verhalten, so erkennt das System dies und versucht daraus eine neue Verhaltensstruktur zu erlernen. Diese Art der Verbrauchssteuerung findet bereits heute in modernen Bürogebäuden Verwendung.

Die umfassende Energieberatung sowie moderne Tools zur Bewusstmachung des Energieverbrauchsverhaltens können ihren Teil dazu beitragen, die Nutzerzufriedenheit zu erhöhen sowie gleichzeitig den Energieverbrauch und somit die Anlageneffizienz zu steigern. Diese Bestrebungen sowie die verstärkte Versorgung der Gebäude durch erneuerbare Energien können ebenfalls dazu führen, die Performancelücke zu schließen und die CO₂-Einsparziele möglichst kostengünstig kurzfristig zu erreichen.

9 Nomenklatur

Formelzeichen und Einheiten

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Einheit</u>
A	Fläche	m^2
A_N	Gebäudenutzfläche nach EnEV 2014/16	m^2
A_{NGF}	Nettogrundfläche	m^2
c_{wirk}	Wirksame Speicherfähigkeit	Wh/K
d	Schichtdicke	m
e_P	Anlagenaufwandszahl	-
f_P	Primärenergiefaktor	-
F_C	Abminderungsfaktor Sonnenschutzeinrichtung	-
F_x	Temperatur-Korrekturfaktor	-
G	Horizontalstrahlung	kWh/m ²
H'_T	Transmissionswärmetransferkoeffizient	W/(m ² K)
$H_{T,D}$	Transmissionswärmetransferkoeffizient zwischen beheizten Räumen und Außenluft	W/K
H_T	Transmissionswärmetransferkoeffizient	W/K
$H_{T,U}$	Transmissionswärmetransferkoeffizient zwischen beheizten und unbeheizten Räumen	W/K
$H_{V,k}$	Lüftungswärmetransferkoeffizient	W/K
I	Strahlungsintensität	W/m ²
n	Luftwechselzahl	h ⁻¹
Q	Wärmemenge	J
Q_E	Endenergiebedarf	kWh
$Q_{h,B}$	Nutzwärmebedarf Heizung	kWh
$Q_{H,P}$	Primärenergiebedarf Heizung	kWh
Q_I	Interne Wärmequellen	kWh
$Q_{L,P}$	Primärenergiebedarf Lüftungssystem	kWh
Q_P	Primärenergiebedarf	kWh
$Q_{P,ref}$	Primärenergiebedarf Referenzgebäude	kWh
Q_S	Solare Wärmequellen	kWh

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Einheit</u>
Q_{sink}	Wärmesenken	kWh
Q_{source}	Wärmequellen	kWh
Q_T	Transmissionswärmeverlust	kWh
$Q_{\text{TW,P}}$	Primärenergiebedarf Trinkwassererwärmung	kWh
Q_V	Transmissionslüftungsverluste	kWh
$Q_{\text{W,B}}$	Nutzwärmebedarf Trinkwarmwasser	kWh
R	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
$R_{i,a}$	Wärmeübergangswiderstand, innen bzw. außen	(m ² K)/W
S_F	Strahlungsgewinnkoeffizient	W/(m ² K)
T	Dauer	d
T_e	Außentemperatur	°C
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
U_w	Wärmedurchgangskoeffizient Fenster	W/(m ² K)
V	Volumen	m ³

griechische Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
η	Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne	-
η_0	Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne bei $\gamma=1$	-
η_{WRG}	Wärmerückgewinnungsgrad	-
Φ_i	Interner Wärmegewinn	kW/Monat
Φ_s	Mittlerer solarer Strahlungs-Wärmegewinn	kWh
Θ_e	Außentemperatur	± °C
Θ_{ed}	Heizgrenztemperatur	± °C
Θ_i	Innenraumtemperatur	± °C
Θ_j	Durchschnittliche monatliche Temperatur einer angrenzenden Zone	± °C
Θ_k	Durchschnittliche monatliche Lufttemperatur einer angrenzenden Zone	± °C
Θ_u	Mittlere Temperatur einer angrenzenden unbeheizten Zone	± °C
$\Delta\Theta$	Temperaturdifferenz	K
ΔU_{WB}	Wärmebrückenkoeffizient	W/(m ² K)
X	Wärmedurchgangskoeffizient, punktbezogen	W/K
Ψ	Wärmedurchgangskoeffizient, längenbezogen	W/(mK)

Abkürzungen

<u>Abkürzung</u>	<u>Bezeichnung</u>
AW	Außenwand
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BMJV	Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BWK	Brennwertkessel
CO ₂	Kohlenstoffdioxid (Kohlendioxid)
dena	deutsche Energie-Agentur GmbH
dez.	Dezentral
DIN	Deutsche Industrienorm
E	Eingang
EEWärmeG	Erneuerbare Energienwärmegesetz
EFH	Einfamilienhaus
EnEff-Stadt	Energie Effiziente Stadt
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPS	Expandiertes Polystyrol
F	Fenster
foss.	Fossil
FW	Fernwärme
HDF5	Hierarchical Data Format
HeizAnlV	Heizanlagenverordnung
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH
KD	Kellerdecke
KfW	Kreditinstitut für Wiederaufbau
LH	Luftheizung
MFH	Mehrfamilienhaus
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz

<u>Abkürzung</u>	<u>Bezeichnung</u>
OGD	Oberste Geschossdecke
PCM	Latentwärmespeichermaterial (phase change material)
PUR	Polyurethan
R	Riegel
reg.	Regenerativ
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TWW	Trinkwarmwasser
VOC	Flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compound(s))
VoWo	Volkswohnung
W	Wohnung
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WE	Wohneinheit
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WSchV	Wärmeschutzverordnung

10 Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1-1: Entwicklung des Energieverbrauchs für Raumwärme (witterungsbereinigt) und Warmwasser in Wohngebäuden von 2002 bis 2015 im Vergleich zum Basisjahr 1996 (in Anlehnung an dena 2016)</i>	<i>1</i>
<i>Abb. 1-2: Gegenüberstellung des Endenergieverbrauchs nach Gebäudetypen (in Anlehnung an dena 2016)</i>	<i>2</i>
<i>Abb. 1-3: Wohnungsbestand der Bauten der 50er und 60er Jahre in Deutschland (in Anlehnung an Bundesamt für Raumordnung 2008)</i>	<i>3</i>
<i>Abb. 1-4: Beispielgrundriss eines Zweispanners aus den 50er Jahren (Wohnungswirtschaft 2005)</i>	<i>4</i>
<i>Abb. 1-5: Entwicklung der Energieeinsparverordnung</i>	<i>5</i>
<i>Abb. 1-6: Qualitative Darstellung von Bedarfswerten und gemessener Energieverbräuche vor und nach den Sanierungsmaßnahmen (in Anlehnung an Galvin 2013a; Cali 2016)</i>	<i>7</i>
<i>Abb. 2-1: Vergleich der Bilanzierungsverfahren nach DIN V 4108/4701 und DIN V 18599 (in Anlehnung an Raack 2011)</i>	<i>10</i>
<i>Abb. 2-2: Übersicht der Normenteile der DIN V 18599 und deren Einsatzbereich (DIN V 18599)</i>	<i>13</i>
<i>Abb. 2-3: Gegenüberstellung der Energieverluste von Mehrfamilienhäusern der 60er Jahre am Beispiel von Riegel 2</i>	<i>18</i>
<i>Abb. 2-4: Sanierungsraten 2005 bis 2008 in Altbauten (Baujahr bis 1978) für verschiedene Bauteile sowie nach Gebäudeart und Region (in Anlehnung an IWU 2010)</i>	<i>19</i>
<i>Abb. 2-5: Die fünf häufigsten energetischen Modernisierungen (Einzelmaßnahmen im Jahr 2014 laut KfW-Statistik)</i>	<i>21</i>
<i>Abb. 3-1: Quartier in Karlsruhe-Rintheimer Feld aus nördlicher Richtung (Quelle: VOLKSWOHNUNG Karlsruhe)</i>	<i>25</i>
<i>Abb. 3-2: Grundriss eines Riegels mit seinen drei Eingängen</i>	<i>26</i>
<i>Abb. 3-3: Querschnitt durch einen Riegel</i>	<i>27</i>
<i>Abb. 3-4: Positionierung und Lage der betrachteten Gebäuderiegel</i>	<i>28</i>
<i>Abb. 3-5: Westfassade vor (links) und nach (rechts) der energetischen Modernisierung</i>	<i>28</i>
<i>Abb. 3-6: Schema der technischen Anlagen für Riegel 1</i>	<i>31</i>
<i>Abb. 3-7: Schema der technischen Anlagen für Riegel 2 Eingang 1</i>	<i>33</i>
<i>Abb. 3-8: Schema der technischen Anlagen für Riegel 2 Eingang 2</i>	<i>34</i>
<i>Abb. 3-9: Schema der technischen Anlagen für Riegel 2 Eingang 3</i>	<i>35</i>
<i>Abb. 3-10: Schema der technischen Anlagen für Riegel 3 Eingang 1</i>	<i>36</i>
<i>Abb. 3-11: Schema der technischen Anlagen für Riegel 3 Eingang 2</i>	<i>37</i>
<i>Abb. 3-12: Schema der technischen Anlagen für Riegel 3 Eingang 3</i>	<i>38</i>
<i>Abb. 3-13: Energiekennzahlen im Gebäude</i>	<i>39</i>
<i>Abb. 3-14: Vergleich Ist-Gebäude und Referenzgebäude nach EnEV</i>	<i>39</i>
<i>Abb. 3-15: Grafische Darstellung eines Berechnungsblattes des EnEV-Berechnungstools sowie der entsprechenden Bearbeitungsblätter (untere Leiste)</i>	<i>40</i>
<i>Abb. 3-16: Gegenüberstellung der spezifischen Transmissionswärmeverluste vor (rot) und nach der Sanierung für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3)</i>	<i>42</i>

<i>Abb. 3-17: Gegenüberstellung des Jahres-Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Nutzfläche vor (rot) und nach der Sanierung (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3).....</i>	<i>43</i>
<i>Abb. 3-18: Gegenüberstellung des Endenergiebedarfs vor (rot) und nach der Sanierung (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3)</i>	<i>45</i>
<i>Abb. 3-19: Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs vor (rot) und nach der Sanierung (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3).....</i>	<i>45</i>
<i>Abb. 3-20: Vergleich des spezifischen Heizwärmebedarfs für alle Sanierungsvarianten (grau = Riegel 1; Grüntöne = Riegel 2; Blautöne = Riegel 3) nach DIN V 4108 (Vollfarbe) und DIN V 18599 (Schraffur).....</i>	<i>47</i>
<i>Abb. 4-1: Überblick über die Topologie des Messsystems (in Anlehnung an Cali)</i>	<i>49</i>
<i>Abb. 4-2: Position (rot) sowie Foto des verbauten Messmoduls in den einzelnen Räumen der Wohnungen des Riegels R2 und R3 (in grün Wilo-Messeinheit).....</i>	<i>50</i>
<i>Abb. 4-3: Anbringungsorte der Wandsensoren am Beispiel Ostfassade (Sensorposition grün: unter Putz / rot: unter Dämmung)</i>	<i>52</i>
<i>Abb. 4-4: Gegenüberstellung der Heizgradtage für Potsdam, für die Region 12 (Mannheim) und die erfassten Messwerte für Rintheim im Jahr 2012.....</i>	<i>57</i>
<i>Abb. 4-5: Positionierung der Temperatursensoren unter dem Außenputz Θ_{Wto} sowie in der Trennschicht zwischen Dämmung und Mauerwerk Θ_{Wti}</i>	<i>60</i>
<i>Abb. 4-6: Temperaturverlauf innerhalb der Außenwand (West) von R2.E1.W5 während Februar 2012.....</i>	<i>61</i>
<i>Abb. 4-7: Temperaturverlauf innerhalb der Außenwand (West) von R3.E1.W5 während Februar 2012.....</i>	<i>61</i>
<i>Abb. 4-8: Anteil des Heizens und Trinkwarmwassers am Gesamtverbrauch pro Monat beispielhaft aufgetragen für Eingang E1 des Riegels R3 für das Jahr 2012</i>	<i>63</i>
<i>Abb. 4-9: Anteil des Heizens und Trinkwarmwassers am Gesamtverbrauch pro Monat beispielhaft aufgetragen für Eingang E2 des Riegels R3 für das Jahr 2012</i>	<i>63</i>
<i>Abb. 4-10: Anteil des Heizens und Trinkwarmwassers am Gesamtverbrauch pro Monat beispielhaft aufgetragen für Eingang E3 des Riegels R3 für das Jahr 2012</i>	<i>63</i>
<i>Abb. 4-11: Gegenüberstellung der monatlichen Arbeitszahlen für die fünf installierten Wärmepumpen von R3 und der mittleren monatlichen Außenlufttemperatur für das Jahr 2012.....</i>	<i>64</i>
<i>Abb. 4-12: Monatliche Heizwärmeverbräuche pro Wohnung (R2 und R3) bei mittlerer Außentemperatur über die Jahre 2012 bis 2014.....</i>	<i>65</i>
<i>Abb. 4-13: Verteilung des spezifischen Heizwärmeverbrauchs für R2 und R3 im Jahr 2012</i>	<i>66</i>
<i>Abb. 4-14: Verteilung des spezifischen Heizwärmeverbrauchs für R2 und R3 im Jahr 2013</i>	<i>66</i>
<i>Abb. 4-15.: Verteilung des spezifischen Heizwärmeverbrauchs für R2 und R3 im Jahr 2014</i>	<i>67</i>
<i>Abb. 4-16: Verteilung des spezifischen Trinkwarmwasserenergieverbrauchs für R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3 im Jahr 2012.....</i>	<i>67</i>
<i>Abb. 4-17: Verteilung des spezifischen Trinkwarmwasserenergieverbrauchs für R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3 im Jahr 2013.....</i>	<i>68</i>
<i>Abb. 4-18: Verteilung des spezifischen Trinkwarmwasserenergieverbrauchs für R2.E1 und R3.E1 bis R3.E3 im Jahr 2014.....</i>	<i>68</i>

<i>Abb. 4-19: Aufteilung der monatlichen Energieverbräuche für Trinkwarmwasser und Heizwärme für R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 für das Jahr 2012 in Prozent</i>	69
<i>Abb. 4-20: Aufteilung der monatlichen Energieverbräuche für Trinkwarmwasser und Heizwärme für R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 für das Jahr 2013 in Prozent</i>	70
<i>Abb. 4-21: Aufteilung der monatlichen Energieverbräuche für Trinkwarmwasser und Heizwärme für R2.E1 sowie R3.E1 bis R3.E3 für das Jahr 2014 in Prozent</i>	71
<i>Abb. 4-22: Gesamtenergieverbrauch im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für R2.E1</i>	72
<i>Abb. 4-23: Gesamtenergieverbrauch im Zeitraum Juli 2012 bis Juni 2013 für R3.E1</i>	72
<i>Abb. 4-24: Gegenüberstellung der Wohnungstemperaturen für R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) während der Heizperiode 2012</i>	74
<i>Abb. 4-25: Gegenüberstellung der Wohnungstemperaturen für R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) während der Heizperiode 2012</i>	75
<i>Abb. 4-26: Anteil der Fensteröffnung pro Wohnung für R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) an der Heizperiode 2012</i>	77
<i>Abb. 4-27: Anteil der Fensteröffnung pro Wohnung für R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) an der Heizperiode 2012</i>	77
<i>Abb. 4-28: Durchschnittliche relative Feuchte in den Wohnungen von R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) während der Heizperiode 2012</i>	79
<i>Abb. 4-29: Durchschnittliche relative Feuchte in den Wohnungen von R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) während der Heizperiode 2012</i>	80
<i>Abb. 4-30: Gegenüberstellung des durchschnittliche CO₂-Gehaltes in den Wohnungen von R2.E1 (oben), R2.E2 (Mitte) und R2.E3 (unten) während der Heizperiode 2012</i>	82
<i>Abb. 4-31: Gegenüberstellung des durchschnittliche CO₂-Gehaltes in den Wohnungen von R3.E1 (oben), R3.E2 (Mitte) und R3.E3 (unten) während der Heizperiode 2012</i>	83
<i>Abb. 4-32: Auswertung der Rückmeldung auf die Aussage: Seitdem wir das aktuelle Heizsystem nutzen, gestaltet sich der Umgang mit dem System komfortabler.</i>	84
<i>Abb. 4-33: Auswertung der Antworten auf die Frage: Auf einer Skala von -3 bis 3, wie schätzen Sie sich selbst ein, bezüglich Ihres Energieverbrauchs?</i>	85
<i>Abb. 4-34: Klassifizierung der befragten Mieter nach ihrem Heizwärmeverbrauch im Jahr 2013.</i>	86
<i>Abb. 4-35: Gegenüberstellung des berechneten Heizwärmebedarfs pro Wohneinheit in kWh/(m²a) nach DIN V 4108 für Riegel R3.</i>	87
<i>Abb. 4-36: Gegenüberstellung des Heizwärmeverbrauchs (Wert in der Mitte des Feldes) für R3 während der Heizperiode 2012/2013.</i>	88
<i>Abb. 4-37: Wärmeverschiebungen (q in kWh/m²_{WF}) zwischen den einzelnen Wohnungen von R3 während der Heizperiode 2012/13 als Ergebnis einer dynamischen Simulation.</i>	89
<i>Abb. 4-38: Vergleich der Wärmetransmissionen je Wohnung bezogen auf Wohnfläche für R3 während der Heizperiode 2012/13</i>	90
<i>Abb. 5-1: Vergleich des witterungsbereinigten Heizwärmeverbrauchs und Heizwärmebedarfs nach DIN V 4108-6 für R2 und R3</i>	93

<i>Abb. 5-2: Gegenüberstellung des Energieverbrauchs für Trinkwarmwasserbereitung für R2.E1 sowie E1 bis E3 von R3 für die Jahre 2011 bis 2014 und dem anzusetzenden Bedarf nach DIN V 4701-10 (türkis) und DIN V 18599 (gestrichelt).....</i>	<i>95</i>
<i>Abb. 5-3: Gegenüberstellung des Endenergiebedarfs (grün) und witterungsbereinigten Endenergieverbrauchs (Rotstufen).....</i>	<i>96</i>
<i>Abb. 5-4: Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs und des witterungsbereinigten Primärenergieverbrauchs.....</i>	<i>97</i>
<i>Abb. 5-5: Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (grün) und witterungsbereinigten Heizwärmeverbrauchs (rot) für das Jahr 2012 sowie Energieperformancelücke (gelbe Raute)</i>	<i>98</i>
<i>Abb. 5-6: Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (grün) und witterungsbereinigten Heizwärmeverbrauchs (rot) für das Jahr 2013 sowie Energieperformancelücke (gelbe Raute)</i>	<i>99</i>
<i>Abb. 6-1: Gegenüberstellung der direkten und indirekten Nutzereingriffsmöglichkeiten</i>	<i>101</i>
<i>Abb. 6-2: Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen und Außentemperaturen im Februar 2012 für die Sanierungsvarianten von R2</i>	<i>102</i>
<i>Abb. 6-3: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen im Bad der einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>103</i>
<i>Abb. 6-4: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante im Bad während der Heizperiode 2012</i>	<i>104</i>
<i>Abb. 6-5: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen in der Küche der einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>104</i>
<i>Abb. 6-6: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante in der Küche während der Heizperiode 2012</i>	<i>105</i>
<i>Abb. 6-7: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen im Wohnzimmer der einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>106</i>
<i>Abb. 6-8: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante im Wohnzimmer während der Heizperiode 2012</i>	<i>106</i>
<i>Abb. 6-9: Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperaturen über alle Sanierungsvarianten je Raumnutzung während der Heizperiode 2012</i>	<i>107</i>
<i>Abb. 6-10: Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen bei gemessener Außentemperatur während der Heizperiode 2012</i>	<i>108</i>
<i>Abb. 6-11: Anzahl der vorhandenen Wohnungsinnentemperaturen bei mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012</i>	<i>109</i>
<i>Abb. 6-12: Boxplot der auftretenden Wohnungsinnenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>109</i>
<i>Abb. 6-13: Gegenüberstellung des relativen Heizwärme-Mehrverbrauchs bei sich ändernden Innenraumtemperaturen</i>	<i>110</i>
<i>Abb. 6-14: Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (Grüntöne) nach EnEV, unter Berücksichtigung der Mediantemperatur sowie der witterungsbereinigten Verbrauchswerte (Rottöne).....</i>	<i>111</i>
<i>Abb. 6-15: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern im Badezimmer für alle Sanierungsvarianten über die mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012</i>	<i>112</i>
<i>Abb. 6-16: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge jeder Sanierungsvariante für jeweils zehn Bäder während der Heizperiode 2012</i>	<i>113</i>

<i>Abb. 6-17: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer im Badezimmer an der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>113</i>
<i>Abb. 6-18: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern in der Küche für alle Sanierungsvarianten über die mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012</i>	<i>114</i>
<i>Abb. 6-19: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge je Sanierungsvariante für jeweils zehn Küchen während der Heizperiode 2012</i>	<i>115</i>
<i>Abb. 6-20: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer in den Küchen an der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>115</i>
<i>Abb. 6-21: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern im Wohnzimmer für alle Sanierungsvarianten über die mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode 2012</i>	<i>116</i>
<i>Abb. 6-22: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge je Sanierungsvariante für jeweils zehn Wohnzimmer während der Heizperiode 2012</i>	<i>117</i>
<i>Abb. 6-23: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer in den Wohnzimmern an der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>117</i>
<i>Abb. 6-24: Anzahl der Fensteröffnungen zur jeweiligen Uhrzeit für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>118</i>
<i>Abb. 6-25: Gegenüberstellung der Anteile der Fensteröffnungsdauer in der Heizperiode je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>119</i>
<i>Abb. 6-26: Gegenüberstellung des Anteils der Fensteröffnung für die einzelnen Räume mit und ohne Lüftungsanlage während der Heizperiode 2012</i>	<i>120</i>
<i>Abb. 6-27: Globaler Luftwechsel bei unterschiedlichen Fensteröffnungswinkeln in einem Modellraum von 5,0 m x 4,0 m x 2,5 m (Quelle: in Anlehnung an (Richter et al. 2003))</i>	<i>121</i>
<i>Abb. 6-28: Gegenüberstellung des Luftwechsels im Badezimmer für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>123</i>
<i>Abb. 6-29: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für das Badezimmer je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>123</i>
<i>Abb. 6-30: Gegenüberstellung des Luftwechsels in den Küchen für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>124</i>
<i>Abb. 6-31: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für die Küche je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>125</i>
<i>Abb. 6-32: Gegenüberstellung des Luftwechsels im Wohnzimmer für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>125</i>
<i>Abb. 6-33: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für das Wohnzimmer je Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>126</i>
<i>Abb. 6-34: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Sanierungsvariante während der Heizperiode 2012</i>	<i>127</i>
<i>Abb. 6-35: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für die einzelnen Sanierungsvarianten während der Heizperiode 2012</i>	<i>127</i>
<i>Abb. 6-36: Einfluss des Luftwechsels auf den Heizwärmebedarf nach EnEV</i>	<i>128</i>
<i>Abb. 6-37: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse des Heizwärmebedarfs nach Norm und jeweils mit dem mittleren Luftwechsel (Grüntöne) sowie der Verbrauchswerte (Rottöne) für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten</i>	<i>129</i>
<i>Abb. 6-38: Verteilung des Stromverbrauchs privater Haushalte nach Haushaltsgröße (in Anlehnung an (Frondel et al. 2015))</i>	<i>134</i>
<i>Abb. 6-39: Einfluss der internen Gewinne auf den Heizwärmeverbrauch in Prozent ...</i>	<i>137</i>

<i>Abb. 6-40: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse des Heizwärmebedarfs mit 5 und 8,9 W/m² (Grüntöne) sowie der Verbrauchswerte (Rottöne) für die unterschiedlichen Sanierungen.....</i>	<i>137</i>
<i>Abb. 6-41: Tagesverlauf des Zapfprofils eines Mehrfamilienhauses (Quelle: in Anlehnung an (Viessmann 2008))</i>	<i>139</i>
<i>Abb. 6-42: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R2.E1 während der Heizperiode 2012</i>	<i>139</i>
<i>Abb. 6-43: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E1 während der Heizperiode 2012</i>	<i>140</i>
<i>Abb. 6-44: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E2 während der Heizperiode 2012</i>	<i>140</i>
<i>Abb. 6-45: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E3 während der Heizperiode 2012</i>	<i>141</i>
<i>Abb. 6-46: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R2.E1 pro Monat der Heizperiode 2012</i>	<i>141</i>
<i>Abb. 6-47: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E1 pro Monat der Heizperiode 2012</i>	<i>142</i>
<i>Abb. 6-48: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E2 pro Monat der Heizperiode 2012</i>	<i>142</i>
<i>Abb. 6-49: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E3 pro Monat der Heizperiode 2012</i>	<i>142</i>
<i>Abb. 6-50: Gegenüberstellung der einzelnen Sanierungsvarianten und deren Zapfverhalten über den Tag während der Heizperiode 2012</i>	<i>143</i>
<i>Abb. 6-51: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R2.E1 im Jahr 2012</i>	<i>144</i>
<i>Abb. 6-52: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E1 im Jahr 2012</i>	<i>144</i>
<i>Abb. 6-53: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E2 im Jahr 2012</i>	<i>145</i>
<i>Abb. 6-54: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E3 im Jahr 2012</i>	<i>145</i>
<i>Abb. 6-55: Spannbreite des Energieverbrauchs pro Eingang während 2012</i>	<i>146</i>
<i>Abb. 6-56: Spannweite des Energieverbrauchs pro Eingang während 2013.....</i>	<i>146</i>
<i>Abb. 6-57: Einfluss des Energiebedarfs für die Trinkwarmwassererzeugung auf den Endenergiebedarf.....</i>	<i>147</i>
<i>Abb. 6-58: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R2.E1 .</i>	<i>149</i>
<i>Abb. 6-59: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R2.E2 .</i>	<i>150</i>
<i>Abb. 6-60: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R2.E3 .</i>	<i>150</i>
<i>Abb. 6-61: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R3.E1 .</i>	<i>151</i>
<i>Abb. 6-62: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R3.E2 .</i>	<i>152</i>

<i>Abb. 6-63: Gegenüberstellung der unter Verwendung der gemessenen Faktoren ermittelten Bedarfswerte mit den witterungsbereinigten Verbrauchswerten für die Jahre 2012 und 2013 sowie dem Standard-EnEV-Bedarf für R3.E3.</i>	153
<i>Abb. 7-1: Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs und gemessenen Primärenergieverbrauchs vor und nach der energetischen Sanierung für Riegel R2 und R3</i>	157
<i>Abb. 8-1: Konzept zur dreistufigen Energieberatung</i>	159
<i>Abb. 8-2: Beispielhafte Darstellung eines Verbrauchsprotals</i>	160
<i>Abb. 12-1: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Badezimmerinnenraumtemperaturen der unterschiedlichen Sanierungsvarianten bei entsprechender Außentemperatur</i>	189
<i>Abb. 12-2: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Kücheninnenraumtemperaturen für die Sanierungsvarianten bei entsprechender Außentemperatur</i>	189
<i>Abb. 12-3: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Wohnzimmerinnenraumtemperaturen für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten bei entsprechender Außentemperatur</i>	190
<i>Abb. 12-4: Summenhäufigkeit der mittleren Wohnungsinnentemperaturen je Sanierungsvarianten</i>	190
<i>Abb. 12-5: Gegenüberstellung der mittleren Badezimmerinnenraumtemperaturen der unterschiedlichen Sanierungsvarianten und mittleren Außentemperaturen</i>	191
<i>Abb. 12-6: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante im Bad</i>	191
<i>Abb. 12-7: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen im Bad je Sanierungsvariante</i>	192
<i>Abb. 12-8: Gegenüberstellung der mittleren Kücheninnenraumtemperaturen für alle Sanierungsvarianten und mittleren Außentemperaturen</i>	192
<i>Abb. 12-9: Boxplot der auftretenden Kücheninnenraumtemperaturen für alle Sanierungsvarianten</i>	193
<i>Abb. 12-10: Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperatur in der Küche der einzelnen Sanierungsvarianten</i>	193
<i>Abb. 12-11: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Wohnzimmerinnenraumtemperaturen für die Sanierungsvarianten und mittlerer Außentemperatur</i>	194
<i>Abb. 12-12: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperatur pro Sanierungsvariante im Wohnzimmer</i>	194
<i>Abb. 12-13: Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperaturen im Wohnzimmer der einzelnen Sanierungsvarianten</i>	195
<i>Abb. 12-14: Boxplot der auftretenden Wohnungsinnentemperaturen je Sanierungsvariante</i>	195
<i>Abb. 12-15: Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen bei gemessenen Außentemperaturen</i>	195
<i>Abb. 12-16: Anzahl der vorhandenen Wohnungsinnentemperaturen bei unterschiedlichen Außentemperaturen</i>	196
<i>Abb. 12-17: Summenhäufigkeit der mittleren Wohnungsinnentemperaturen je Sanierungsvariante</i>	196
<i>Abb. 12-18: Summenhäufigkeit der mittleren Wohnungsinnentemperaturen je Raum</i>	197
<i>Abb. 12-19: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Bad je Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage</i>	198

<i>Abb. 12-20: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten in der Küche pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage</i>	198
<i>Abb. 12-21: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Wohnzimmer pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage</i>	199
<i>Abb. 12-22: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R2.E1</i>	199
<i>Abb. 12-23: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R2.E2</i>	199
<i>Abb. 12-24: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R2.E3</i>	200
<i>Abb. 12-25: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R3.E1</i>	200
<i>Abb. 12-26: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R3.E2</i>	200
<i>Abb. 12-27: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R3.E3</i>	201
<i>Abb. 12-28: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Badezimmer für alle Sanierungsvarianten bei mittleren Außentemperaturen</i>	201
<i>Abb. 12-29: Dauer der Fensteröffnung pro Bad je Wohnung und Sanierungsvariante</i>	202
<i>Abb. 12-30: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge pro Bad je Sanierungsvariante</i>	202
<i>Abb. 12-31: Gegenüberstellung des Fensteröffnungsverhaltens für das Badezimmer mit und ohne Lüftungsanlage</i>	203
<i>Abb. 12-32: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten in der Küche für jede Sanierungsvariante bei mittleren Außentemperaturen</i>	203
<i>Abb. 12-33: Dauer der Fensteröffnung pro Küche je Wohnung und Sanierungsvariante</i>	204
<i>Abb. 12-34: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge pro Küche je Sanierungsvariante</i> ..	204
<i>Abb. 12-35: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten in der Küche pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage</i>	205
<i>Abb. 12-36: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Wohnzimmer für alle Sanierungsvarianten bei mittleren Außentemperaturen</i>	205
<i>Abb. 12-37: Dauer der Fensteröffnung pro Wohnzimmer je Wohnung und Sanierungsvariante</i>	206
<i>Abb. 12-38: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge pro Wohnzimmer je Sanierungsvariante</i>	206
<i>Abb. 12-39: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Wohnzimmer pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage</i>	207
<i>Abb. 12-40: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R2.E1</i>	207
<i>Abb. 12-41: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R2.E2</i>	207
<i>Abb. 12-42: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R2.E3</i>	208
<i>Abb. 12-43: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R3.E1</i>	208
<i>Abb. 12-44: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R3.E2</i>	208
<i>Abb. 12-45: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R3.E3</i>	209
<i>Abb. 12-46: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Sanierungsvariante</i>	209
<i>Abb. 12-47: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für das Bad je Sanierungsvariante</i>	209
<i>Abb. 12-48: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für die Küche je Sanierungsvariante</i>	210

<i>Abb. 12-49: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für das Wohnzimmer je Sanierungsvariante</i>	210
<i>Abb. 12-50: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für die einzelnen Sanierungsvarianten</i>	211
<i>Abb. 12-51: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit für die jeweiligen Räume unterschieden nach Sanierungsvariante mit und ohne Lüftungsanlage</i>	211
<i>Abb. 12-52: Anzahl der Fensteröffnungen pro Uhrzeit für die einzelnen Sanierungsvarianten sowie mit und ohne Lüftungsanlage</i>	212
<i>Abb. 12-53: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R2.E1</i>	213
<i>Abb. 12-54: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E1</i>	213
<i>Abb. 12-55: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E2</i>	213
<i>Abb. 12-56: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E3</i>	214
<i>Abb. 12-57: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R2.E1</i>	214
<i>Abb. 12-58: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E1</i>	215
<i>Abb. 12-59: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E2</i>	215
<i>Abb. 12-60: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E3</i>	215
<i>Abb. 12-61: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R2.E1 pro Monat der Heizperiode 2013</i>	216
<i>Abb. 12-62: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E1 pro Monat der Heizperiode 2013</i>	216
<i>Abb. 12-63: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E2 pro Monat der Heizperiode 2013</i>	217
<i>Abb. 12-64: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E3 pro Monat der Heizperiode 2013</i>	217
<i>Abb. 12-65: Gegenüberstellung der einzelnen Sanierungsvarianten und deren Zapfverhalten über den Tag während der Heizperiode 2013</i>	218
<i>Abb. 12-66: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R2.E1 im Jahr 2013</i>	218
<i>Abb. 12-67: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E1 im Jahr 2013</i>	219
<i>Abb. 12-68: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E2 im Jahr 2013</i>	219
<i>Abb. 12-69: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E3 im Jahr 2013</i>	220
<i>Abb. 12-70: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R2.E1</i>	220
<i>Abb. 12-71: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E1</i>	220
<i>Abb. 12-72: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E2</i>	221
<i>Abb. 12-73: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E3</i>	221

11 Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 2-1: Grenzwerte Transmissionswärmeverlust nach Gebäudeart nach EnEV 2016.</i>	9
<i>Tab. 2-2: Randbedingungen nach DIN V 4108-6 für MFH.....</i>	10
<i>Tab. 2-3: Randbedingungen nach DIN V 18599-10 für MFH.....</i>	14
<i>Tab. 3-1: Eckdaten der zu sanierenden Gebäuderiegel.....</i>	26
<i>Tab. 3-2: Gegenüberstellung der sechs durchgeführten Sanierungsvarianten</i>	29
<i>Tab. 3-3: Gegenüberstellung der U-Werte von Riegel 1 vor und nach der Sanierung... </i>	30
<i>Tab. 3-4: Gegenüberstellung der U-Werte von Riegel 2 vor und nach der Sanierung... </i>	32
<i>Tab. 3-5: Gegenüberstellung der U-Werte vor und nach der Sanierung für Riegel 3 ...</i>	35
<i>Tab. 4-1: Übersicht der raumweise gewonnenen Messdaten aus dem „Messpitz“</i>	50
<i>Tab. 4-2: Übersicht der außerhalb des Raumes gewonnenen Daten</i>	51
<i>Tab. 4-3: Messgrößen der Wetterstation</i>	53
<i>Tab. 4-4: Gegenüberstellung der Außentemperaturen der Region 12 (Mannheim), Potsdam und Wetterstation Rintheim</i>	55
<i>Tab. 4-5: Gegenüberstellung der Horizontalstrahlung für unterschiedliche Standorte und Jahre</i>	56
<i>Tab. 4-6: Gegenüberstellung der Korrekturfaktoren zur Witterungsbereinigung der Verbrauchsdaten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Heizgrenzen ...</i>	58
<i>Tab. 6-1: Empfohlene Lüftungsdauer bei Stoßlüftung in den Monaten der Heizperiode (Quelle: (IWU 2012))</i>	122
<i>Tab. 6-2: Geräteausstattung eines Ein-Personen-Haushaltes.....</i>	134
<i>Tab. 6-3: Geräteausstattung eines Zwei-Personen-Haushaltes ohne Kind</i>	134
<i>Tab. 6-4: Geräteausstattung eines Zwei-Personen-Haushaltes mit Kind</i>	135
<i>Tab. 6-5: Abschätzung des mittleren internen Wärmestroms für unterschiedliche Haushaltstypen</i>	136
<i>Tab. 6-6: Verteilung der Parameter der Messdatenanalyse in der Heizperiode 2012</i>	148
<i>Tab. 6-7: Verteilung der Parameter der Messdatenanalyse in der Heizperiode 2013</i>	148

12 Literaturverzeichnis

Amt für Stadtentwicklung Karlsruhe (2010): Stadtteilprofile Karlsruhe.

Amt für Stadtentwicklung Karlsruhe (2011): Gebäude und Wohnungen in Karlsruhe: Ergebnisse des Zensus 2011.

Norm DIN EN ISO 7730, Mai 2006: Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.

ASHRAE (2009): Ashrae Handbook: Fundamentals. Atlanta and GA (ISBN 978-1-933742-54-0).

ASUE (2015): Kraft-Wärme-Kopplung – der Umwelt und dem Geldbeutel zuliebe. Präsidiumssitzung. ASUE, 08/2015. Online verfügbar unter <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjz9dOlnOjUAhXIPFAKHSa5C18QFghN-MAC&url=http%3A%2F%2Fwww.asue.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fasue%2Fthemen%2Fblockheizkraftwerke%2F2015%2Fbroschueren%2Fenergieberater-final.pptx&usg=AFQjCNGNJH1tIclQue18ahucs9n8vz91gQ>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

Norm DIN EN ISO 6946, April 2008: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren.

BMWi (2010): Eckpunkte Energieeffizienz. Hg. v. BMWi. Online verfügbar unter <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:r5K5rBqXyOsJ:www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/eckpunkte-energieeffizienz,property%3Dpdf,bereich%3Dbmwi,sprache%3Dde,rwb%3Dtrue.pdf+%&cd=2&hl=de&ct=clnk&gl=de>, zuletzt geprüft am 20.03.2016.

BMWi (2016): Fünfter Monitoring Bericht zur Energiewende. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin.

Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (Januar 2009): Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich. EEWärmeG, vom Januar 2009.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. Online verfügbar unter <http://www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/aktionsprogramm>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2014a): Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. NAPE. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=672756.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2014b): Zahlen und Fakten - Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-datengesamt>,

- Cali, D. (2016): Occupants' behavior and its impact upon the energy performance of buildings. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik.
- Cali, D.; Heesen, F.; Osterhage, T.; Streblow, R.; Madlener, R.; Müller, D. (2016a): Energieeinsparpotential sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen. 1. Aufl. Hg. v. Fraunhofer IRB Verlag. RWTH Aachen. Stuttgart.
- Cali, D.; Osterhage, T.; Wesseling, M.; Müller, D. (2016b): Energy Performance Gap – Erfahrungen mit sanierten Wohnungen. Teil 1. In: *TAB Technik am Bau* (11), S. 70–74.
- Cali, D.; Osterhage, T.; Wesseling, M.; Müller, D. (2016c): Energy Performance Gap – Erfahrungen mit sanierten Wohnungen. Teil 2. In: *TAB Technik am Bau* (12), S. 46–51.
- Dall'O', G.; Sarto, L.; Galante, A.; Pasetti, G. (2012): Comparison between predicted and actual energy performance for winter heating in high-performance residential buildings in the Lombardy region (Italy). In: *Energy and buildings* (47), S. 247–253.
- David, Ruth; Boer, Jan d.; Erhorn, Hans; Reiss, Johann; Rouvel, Lothar; Schiller, Heiko (2006.): Heizen, Kühlen, Belüften & Beleuchten: Bilanzierungsgrundlagen zur DIN V 18599. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- dena (2013): Energiesparen wird immer noch unterschätzt. Online verfügbar unter <http://www.dena.de/presse-medien/pressemitteilungen/umfrage-energiesparen-wird-immer-noch-unterschaetzt.html>.
- dena (2016): Expertendatenbank. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH. dena. Online verfügbar unter <http://www.dena.de/projekte/gebaeude/expertendatenbank-fuer-energieeffizientes-bauenund->.
- dena (2017): dena-Gebäudereport 2016. Hg. v. dena.
- Destatis (2014a): Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern. Hg. v. Destatis (Fachserie 15 Reihe 2).
- Destatis (2014b): Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern. Hg. v. Destatis (Fachserie 15 Reihe 2).
- Destatis (2015): Wohnungen nach Baujahr. Destatis. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/>, zuletzt geprüft am 13.12.2015.
- Ebel, Witta; Grossklos, Marc; Knissel, Jens; Loga, Tobias; Müller, Kornelia (2003): Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern: Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der "Gartenhofsiedlung Lummerlung" in Wiesbaden-Dotzheim. Teilbericht Bauprojekt, messtechnische Auswertung, Energiebilanzen und Analyse des Nutzereinflusses. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH. Darmstadt.
- Eduard Pestel Institut e.V. (2009): Wohnungsmangel in Deutschland? Regionalisierter Wohnungsbedarf bis zum Jahr 2025. Hannover.
- Ehm, H. (1996): Wärmeschutzverordnung '95. Hg. v. Bauverlag. Wiesbaden.

Eisland, Rainer; Bossmann, Tobias; Pepksen, Ilhan; Wietschel, Martin (2011): Auswirkungen von Nutzerverhalten und Klimawandel auf den Heizwärmebedarf im europäischen Haushaltssektor bis 2050. Themenbereich: 5. Energieeffizienz in Gebäuden.

Vornorm DIN V 4701-10, August 2003: Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung.

Vornorm DIN V 18599-1, Dezember 2011: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.

Vornorm DIN V 18599-10, Dezember 2011: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.

Vornorm DIN V 18599 Beiblatt 1, Januar 2010: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Beiblatt 1: Bedarfs-/Verbrauchsabgleich.

Erhorn, H.; Reiß, J. (2010): Lüftungsverhalten in Wohnungen. Hg. v. EnEV aktuell. Beuth Verlag. Berlin.

Erhorn, Hans (2007): Bedarf – Verbrauch: Ein Reizthema ohne Ende oder die Chance für sachliche Energieberatung? Hg. v. Fraunhofer Institut für Bauphysik. Stuttgart.

Feist, W. (1994): Thermische Gebäudesimulation: Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. 1. Auflage: Müller, Jur. Verl.

Felsmann, C.; Schmidt, J. (2013): Auswirkungen der verbrauchsabhängigen Abrechnung in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität. Hg. v. TU Dresden. Institut für Energietechnik. Dresden.

Fischer, C. (2008): Strom sparen im Haushalt. Trends, Einsparpotenziale und neue Instrumente für eine nachhaltige Energiewirtschaft. Hg. v. C. Fischer. München.

Fischer, H.-M.; Stohrer, M.; Homann, M., et al (2008): Lehrbuch der Bauphysik. 6. Aufl. (Lehrbuch der Bauphysik).

Fronzel et al. (2015): Stromverbrauch privater Haushalte in Deutschland: Eine ökonomische Analyse. Hg. v. RWI. Essen.

Galvin, R. (2013a): Making the 'rebound effect' more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the 'energy savings deficit' and the 'energyperformance gap'. Hg. v. Energy and buildings (69).

Galvin, Ray (2013b): Targeting 'behavers' rather than behaviours: A 'subject-oriented' approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings. Online verfügbar unter <http://ac.els-cdn.com/S0378778813005641/1-s2.0->

- S0378778813005641-main.pdf?_tid=06195d14-9d42-11e3-8231-00000aab0f6b&acd-nat=1393239444_of73001c3f4bad8ef45081e324a323d9, zuletzt aktualisiert am 25.10.2013., zuletzt geprüft am 24.02.2014.
- Geiger, B.; Rouvel, L. (1987): Lüftung im Wohnungsbau mit Fensterlüftung. Hg. v. HLH (Heizung Lüftung Haustechnik HLH).
- Glück, B. (2008): Heizen und Kühlen mit Niedrigexergie (LowEX): Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung.
- Haas, R.; Biermayr, P. (2000): The rebound effect for space heating Empirical evidence from Austria. In: *Energy Policy* (28(6)), S. 403–410.
- Hartmann, P.; Pfiffner, I. (1978): Luftwechsel-Meßwerte von ausgewählten Wohnbauten in der Schweiz. 3. Aufl. Hg. v. KI Klima Kälte Ingenieur.
- Hennicke, P. (2008): Klima und Bevölkerung. Online verfügbar unter <http://www.berlin-institut.org/online-handbuchdemografie/umwelt/klima-und-bevoelkerung.html>, zuletzt geprüft am 28.07.15.
- Hens, Hugo (2010): Energy efficient retrofit of an end of the row house: Confronting predictions with long-term measurements. In: *Energy and buildings* (42(10)), S. 1939–1947.
- Hens, Hugo; Parijs, Wout; Deurinck, Mieke (2010): Energy consumption for heating and rebound effects. In: *Energy and buildings 2010* (42(1)), S. 105–110.
- Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hg.) (2011): Wärmedämmung von Außenwänden mit dem Wärmedämmverbundsystem. Wissenswertes über Außenwanddämmung bei Alt- und Neubauten. *Energiespar-Information* (02).
- Hirst, Eric; Brown, Marilyn (1990): Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. In: *Resources, Conservation and Recycling* (Volume 3, Issue 4), S. 267–281, zuletzt geprüft am 16.04.2015.
- Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hg.) (2010): Datenbasis Gebäudebestand. IWU. Darmstadt. Online verfügbar unter http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Endbericht_Datenb.
- Interessengemeinschaft Energie, Umwelt GmbH (Hg.) (2011): Heizungsmodernisierung: Erster Schritt zur Energieeinsparung. *Informationsblatt* (02). Köln.
- Interessengemeinschaft Energie, Umwelt GmbH (Hg.) (2013): Wohnungslüftung in der Modernisierung / Sanierung. *Informationsblatt* (55). Köln.
- IWU (Hg.) (2009): Energiebilanz- und Wirtschaftlichkeitsberechnung für ein vermietetes Mehrfamilienhaus im Bestand. Darmstadt.
- IWU (2012): Lüftung im Wohngebäude. WISSENSWERTES ÜBER DEN LUFTWECHSEL UND MODERNE LÜFTUNGSMETHODEN. 8. Aufl. Hg. v. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

- Jagnow, Kati; Wolff, Dieter (2008): Umweltkommunikation in der mittelständischen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zu nachhaltigen Nutzung von Energieeinsparpotenzialen: Teil 2: Technische Optimierung und Energieeinsparung. (Teil 2). Online verfügbar unter <http://optimus-online.de/pdf/Endbericht%20Teil%202.pdf>, zuletzt geprüft am 04.02.2016.
- Jank, R.; Kuklinski, R. (2015): Integrales Quartiers-Energiekonzept. Am Beispiel Karlsruhe-Rintheim. Hg. v. pro:21. Stuttgart (EnEff:Stadt Schriftenreihe). Online verfügbar unter <http://www.eneff-stadt.info/de/publikationen/publikation/details/integrales-quartiers-energiekonzept-karlsruhe-rintheim/>, zuletzt geprüft am 21.03.2016.
- Kluttig, H.; Erhorn, H. (1998): Niedrigenergiehäuser in Ziegelbauweise. Hg. v. Fraunhofer Institut für Bauphysik. Stuttgart.
- Knissel, Jens (2003): Verbessertes Modell zur Simulation des Fensterluftwechsels. Hg. v. Passivhaus-Insitut.
- Künzel, H. (1979): Repräsentativumfrage über die Heiz- und Lüftungsverhältnisse in Wohnungen. Hg. v. Gesundheitsingenieur GI. Berlin.
- Loga, Tobias; Grossklos, Marc; Knissel, Jens (2003): Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten: Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt GmbH. Darmstadt.
- Maas, A. (1995): Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung (Dissertation).
- Manara, J. (2008): Wärmespeicher als integrierte und nicht integrierte Bauteile. In: *FVEE Themen*.
- Menezes, Anna Carolina; Cripps, Andrew; Bouchlaghem, Dino; Buswell, Richard (2012): Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. In: *Applied Energy* (97), S. 355–364.
- Mügge, G.; Esdorn, H. (1986): Untersuchung zur Anpassung der Rechenätze für die Ermittlung des Jahresheizwärmeverbrauchs nach VDI 2067/2 an die veränderten Verhältnisse bezüglich der Wärmebedarfsrechnung, der hochgedämmten Bauarten und des Nutzverhaltens.
- Müller, D.; Osterhage, T.; Cali, D. (2016): EnEff:Stadt - Auswirkungen des Reboundeffekts bei der Sanierung von Bestandsgebäuden. RWTH Aachen. Aachen.
- Olonschek, M.; Holsten, A.; Kropp, J. P. (2011): Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. Hg. v. Potsdam Institute for Climate Research. Potsdam.
- Oschatz, Bert (2009): Erarbeitung eines Leitfadens zum Abgleich Energiebedarf - Energieverbrauch: Abschlussbericht.

- Osterhage, T.; Cali, D.; Müller, D.; Voß, R. (2016): Auswirkung von Wärmeverschiebungsvorgängen in energieeffizient sanierten Bestandswohngebäuden. In: *Bauphysik* (1).
- Pehnt, M.; Nast, M. (2016): *Wärmewende 2017. Impulse für eine klimafreundliche Wärmeversorgung*. Hg. v. Heinrich-Böll-Stiftung e.V. Berlin.
- Pettenkofer, M. (1858): *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. München: Literarisch-Artistische Anstalt der J. G. Cotta'schen Buchhandlung.
- Raack, Andreas (2011): *Energetische Bilanzierung von Wohngebäuden*. GIH Gebäudeenergieberater, Ingenieure, Handwerker e.V. Baden-Württemberg, 2011. Online verfügbar unter <http://www.gih-bw.de/LinkClick.aspx?fileticket=PQnY2UDML9s%3D&tabid=1770&mid=4978>, zuletzt geprüft am 20.03.2016.
- Raschper, Norbert (2010): Warum Verbrauchswerte und Bedarfsberechnungen voneinander abweichen: Energieeinsparpotenziale bei Bestandsgebäuden - Teil 2. In: *DW Die Wohnungswirtschaft*, 2010 (Nr. 11), S. 52–54.
- Norm DIN 1946-2, Januar 1994: *Raumluftechnik - Gesundheitstechnische Anforderungen*.
- Norm DIN 1946-6, Mai 2009: *Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen*.
- Reiß, J.; Erhorn, H. (1994): *Niedrigenergiehäuser Heidenheim*. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Stuttgart.
- Richter, W.; Ender, T.; Hartmann, T.; Kremonke, A.; Oschatz, B.; Seifert, J. (2002): *Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch in Niedrigenergie- und Passivhäusern*. Hg. v. TU Dresden. Institut für Thermodynamik und technische Gebäudeausrüstung. Dresden.
- Richter, W.; Siefert, J.; Gritzki, R.; Rösler, M. (2003): *Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht*. Hg. v. TU Dresden.
- Roggel, K. (2000): *Bedeutung der Wärmespeicherung für Raumklima und Energieeinsparung*. Technische Universität Berlin. Online verfügbar unter http://www.klausroggel.de/waer_spei.htm, zuletzt geprüft am April 2017.
- Rohracher, H. et al. (2001): *Akzeptanzverbesserungen bei Niedrigenergiehaus-Komponenten*. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien.
- RWI (2013): *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012*. Hg. v. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Bonn (Projektnummer-. 23/11).
- Schröder, F.; Engler, H. J.; Boeglein, T.; Oelwärther, Ch.: *Spezifischer Heizenergieverbrauch und Temperaturverteilungen in Mehrfamilienhäusern: Rückwirkung des Sanierungsstandes auf das Nutzerverhalten*. In: *HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik* 2010 (Nr. 11), S. 22–25.

Schröder, Franz P.; Papert, Olaf; Boeglein, Tobias; Navaro, Hendrikus; Mundry, Bernhard: Reale Trends des spezifischen Energieverbrauchs und repräsentativer Wohnraumtemperierung bei steigendem Modernisierungsgrad im Wohnungsbestand. In: *Bauphysik* 2014 (Nr. 6), S. 309–324. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201410045>. – DOI 10.1002/bapi.201410045.

Stolte, Christian; Marcinek, Heike; Bigalke, Uwe; Zeng, Yang (2013a): Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizient sanierter Wohngebäude. Begleitforschung zum dena-Modellvorhaben Effizienzhäuser. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Online verfügbar unter http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Meldungen/2013/Studie_.

Stolte, Christian; Marcinek, Heike; Bigalke, Uwe; Zeng, Yang (2013b): Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizient sanierter Wohngebäude. Begleitforschung zum dena-Modellvorhaben Effizienzhäuser. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Online verfügbar unter http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Meldungen/2013/Studie_Auswertung_von_Verbrauchskennwerten.pdf. Version, zuletzt geprüft am 14.02.2015.

Tuschinski, M. (2017): GEG GebäudeEnergieGesetz gescheitert: Koalitionsausschuss konnte sich nicht einigen. Online verfügbar unter http://www.enev-online.eu/geg_news/170330_keine_einigung_zum_geg_position_bundesbauministerin_barbara_hendricks.htm, zuletzt geprüft am April 2017.

Umweltbundesamt (2007): Umweltdaten Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau.

Usemann, K. (2004): Mindestwärmeschutz und Jahresheizwärmebedarf: Praktische Beispiele nach DIN 4108. Hg. v. Springer Verlag. Berlin.

VDI VDI 3807 Blatt 1, 2013: Verbrauchskennwerte für Gebäude - Grundlagen.

VDI 3807 Blatt 1, Juni 2013: Verbrauchskennwerte für Gebäude Grundlagen.

Viessmann (2008): Planungshandbuch Solarthermie. Hg. v. Viessmann Werke. Allendorf.

Virote, João; Neves-Silva, Rui (2012): Stochastic models for building energy prediction based on occupant behavior assessment. In: *Energy and buildings* (53), S. 183–193. Online verfügbar unter DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.06.001.

Norm DIN 4108 Beiblatt 2, November 2017: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken.

Vornorm DIN V 4108-6, Juni 2003: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.

Norm DIN EN ISO 13789, April 2008: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren.

Wetzlaff, G. (1983): Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren für den Norm-Wärmebedarf und den Jahreswärmeverbrauch von Heizanlagen. Hg. v. VDI-Verlag. Düsseldorf.

VDI 2067, 2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.

VDI VDI 2067 Blatt 1, 2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.

Wohnungswirtschaft (2005): Siedlungen der 50er und 60er Jahre.

Wolfrum, K.; Bloch, A. (2012): Messsystem für vierkanaliges Monitoring von Energieströmen und Raumklimadaten in energetisch sanierten Wohngebäude in Karlsruhe-Rintheim. Hg. v. Hochschule Karlsruhe. Karlsruhe (Forschung aktuell). Online verfügbar unter https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/page/downloads/hs_karlsruhe_forschung_aktuell_2012.pdf.

Zeidler, O. (2000): Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäuden. Hg. v. VDI Verlag. Düsseldorf (VDI Reihe 19 Nr. 134).

13 Anhang

13.1 Innenraumtemperaturen während der Heizperiode 2012

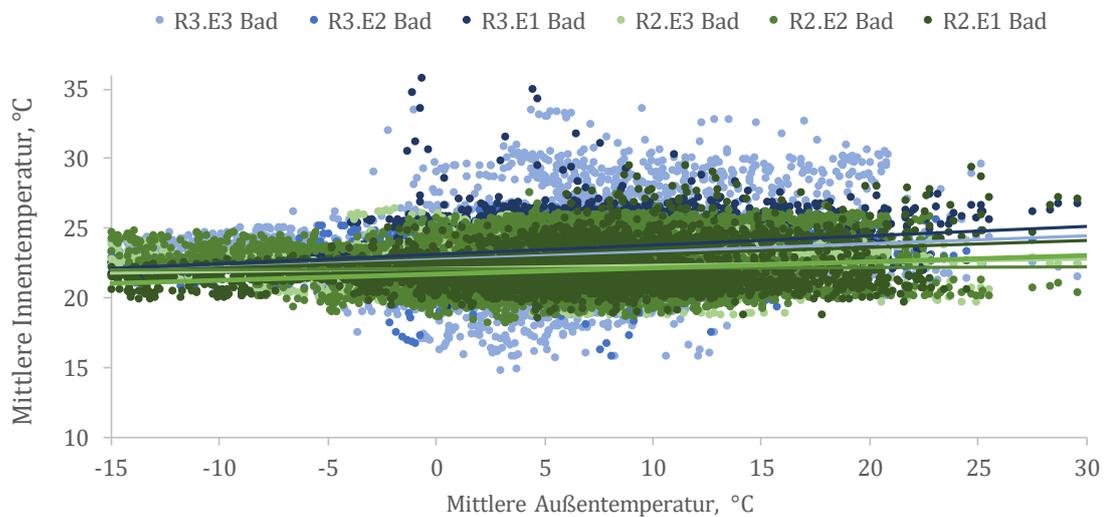


Abb. 13-1: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Badezimmerinnenraumtemperaturen der unterschiedlichen Sanierungsvarianten bei entsprechender Außentemperatur

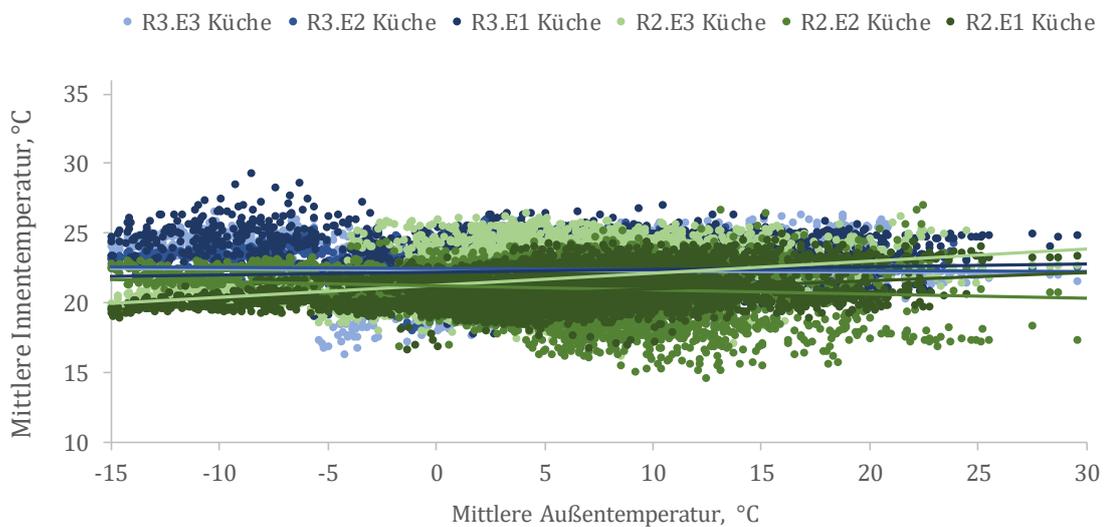


Abb. 13-2: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Kücheninnenraumtemperaturen für die Sanierungsvarianten bei entsprechender Außentemperatur

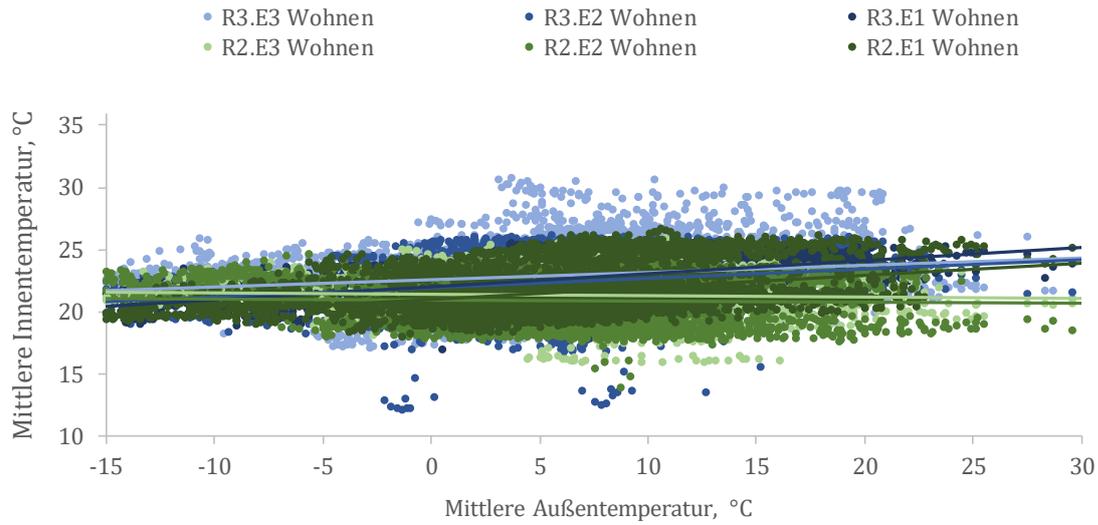


Abb. 13-3: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Wohnzimmerinnenraumtemperaturen für die unterschiedlichen Sanierungsvarianten bei entsprechender Außentemperatur

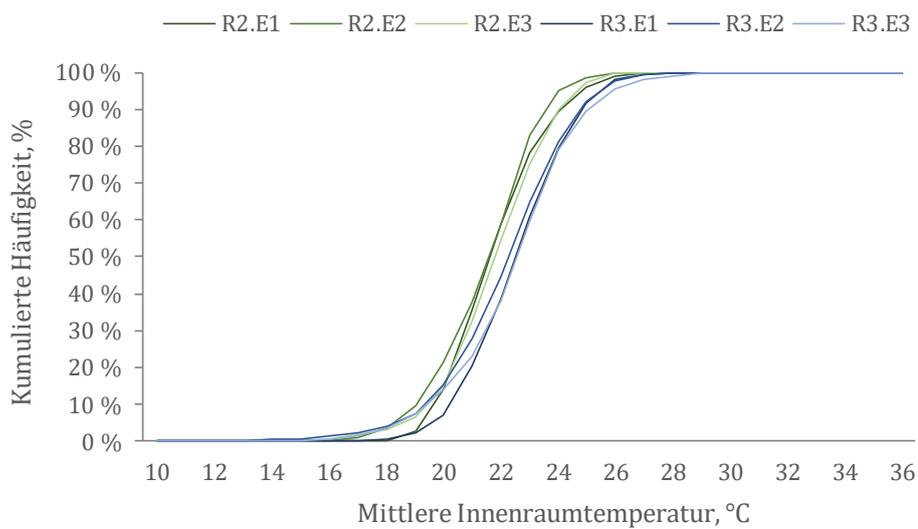


Abb. 13-4: Summenhäufigkeit der mittleren Wohnungsinnentemperaturen je Sanierungsvariante

13.2 Innenraumtemperatur während der Heizperiode 2013

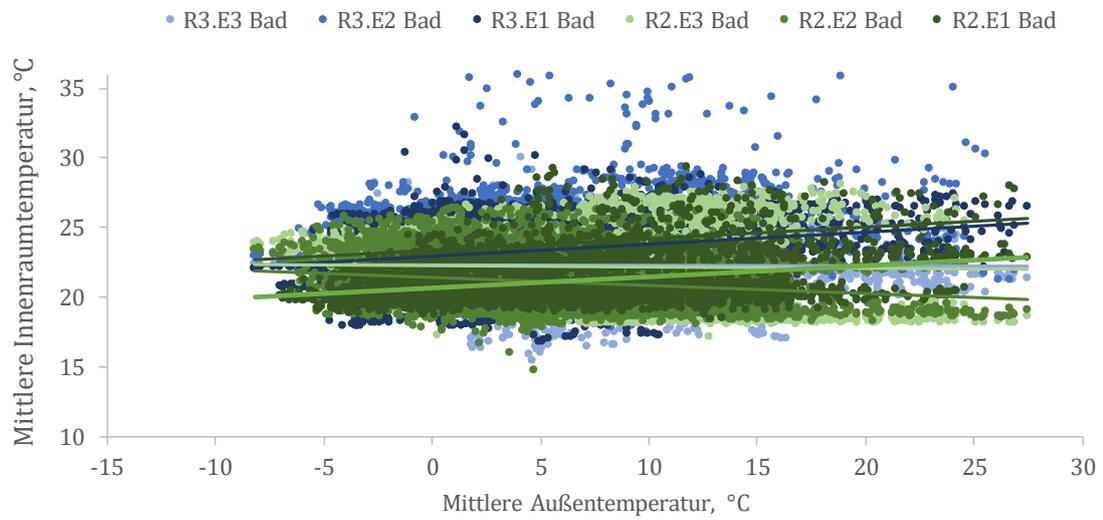


Abb. 13-5: Gegenüberstellung der mittleren Badezimmerinnenraumtemperaturen der unterschiedlichen Sanierungsvarianten und mittleren Außentemperaturen

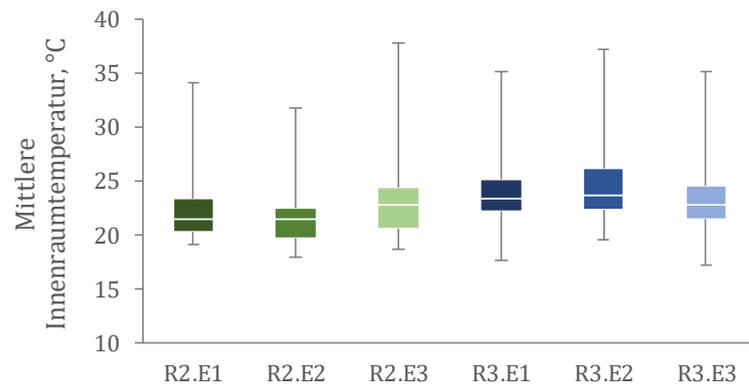


Abb. 13-6: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperaturen pro Sanierungsvariante im Bad

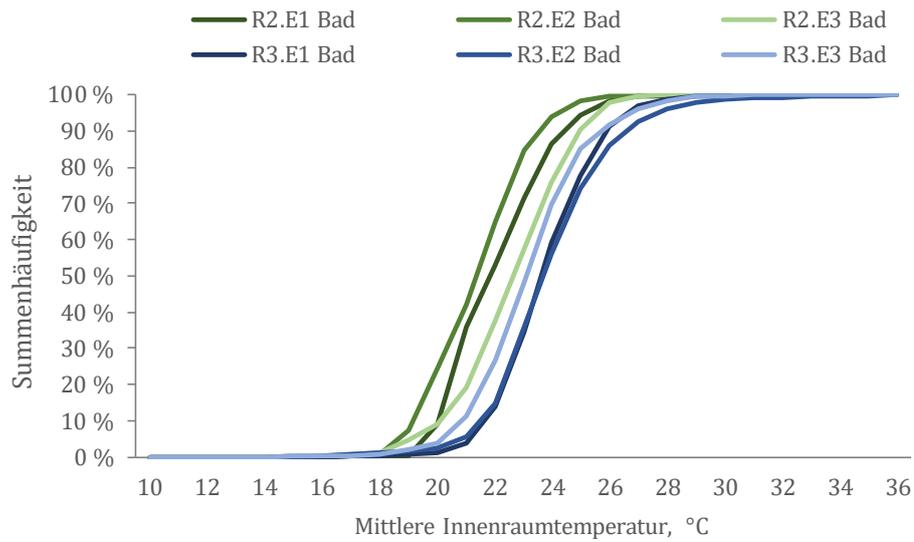


Abb. 13-7: Summenhäufigkeit der Innenraumtemperaturen im Bad je Sanierungsvariante

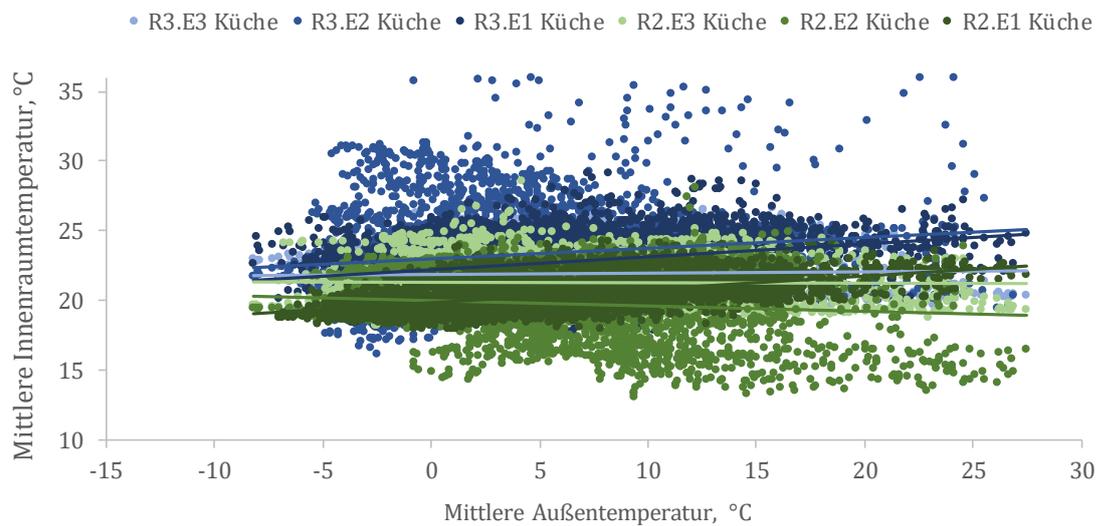


Abb. 13-8: Gegenüberstellung der mittleren Kücheninnenraumtemperaturen für alle Sanierungsvarianten und mittleren Außentemperaturen

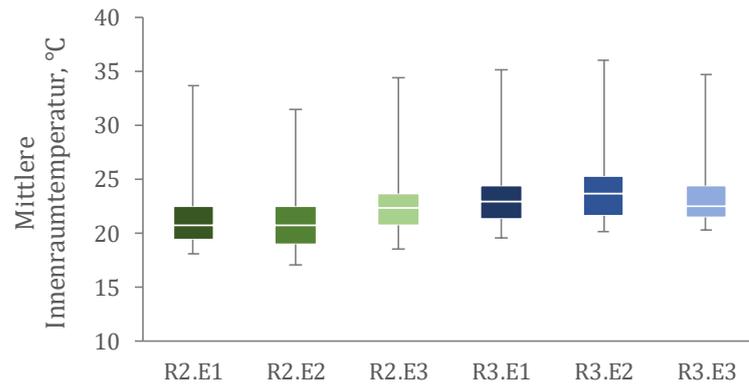


Abb. 13-9: Boxplot der auftretenden Kücheninnenraumtemperaturen für alle Sanierungsvarianten

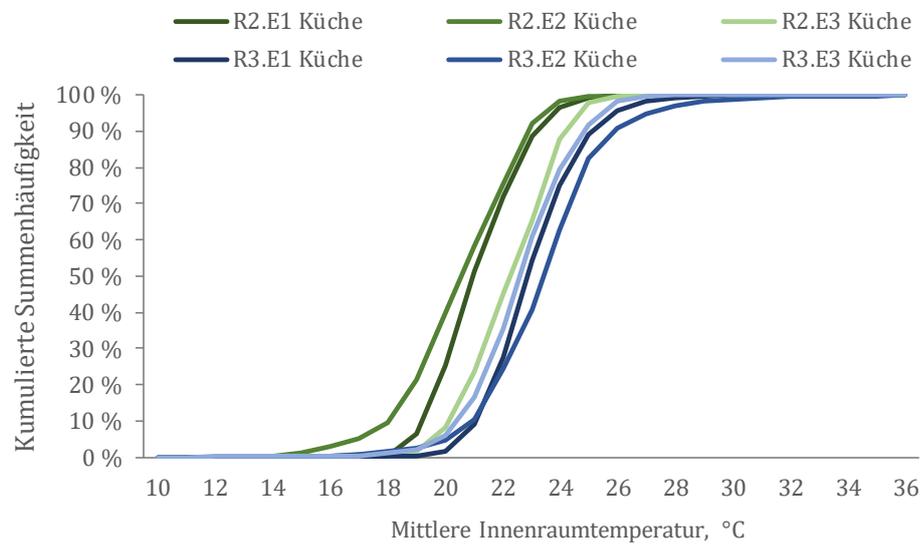


Abb. 13-10: Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperatur in der Küche der einzelnen Sanierungsvarianten

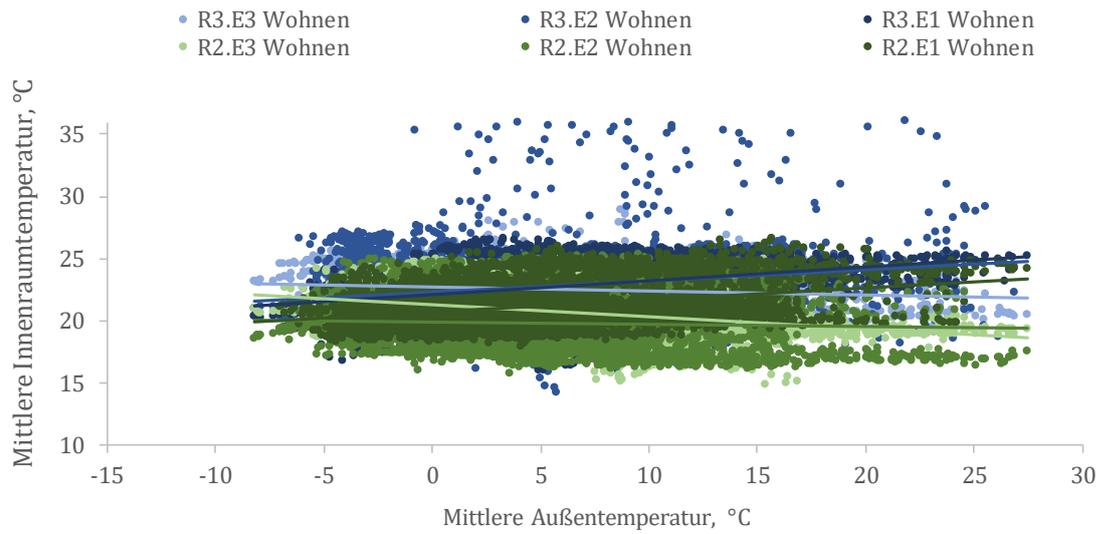


Abb. 13-11: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Wohnzimmerinnenraumtemperaturen für die Sanierungsvarianten und mittlerer Außentemperatur

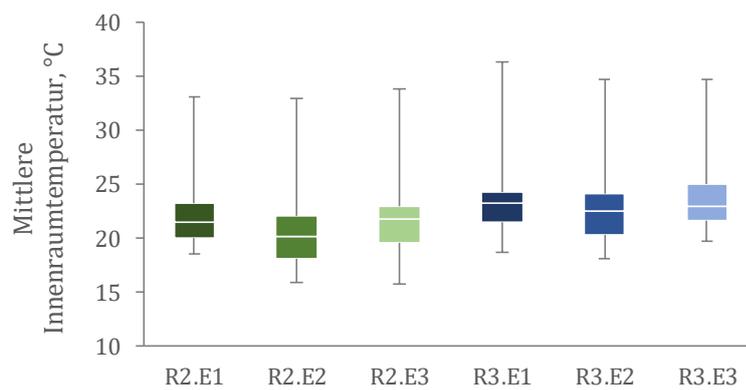


Abb. 13-12: Boxplot der auftretenden Innenraumtemperatur pro Sanierungsvariante im Wohnzimmer

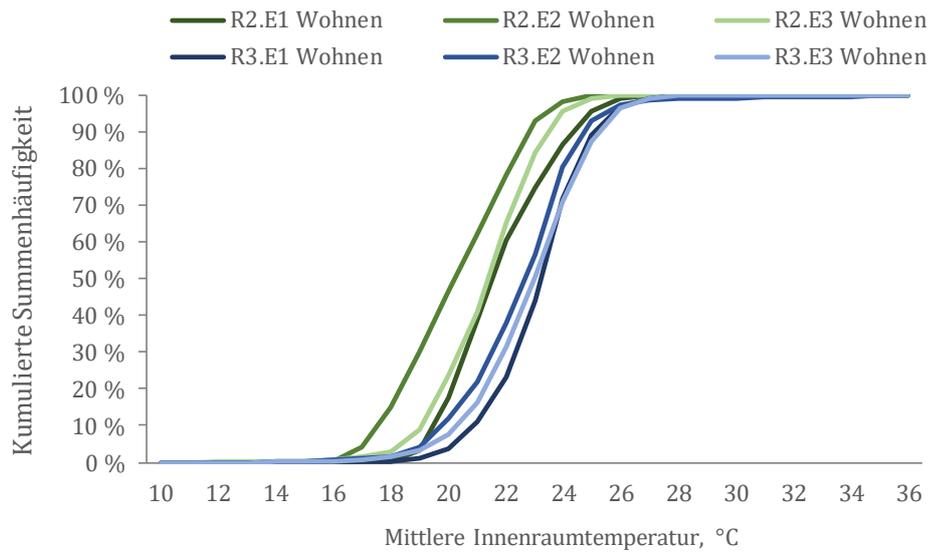


Abb. 13-13: Summenhäufigkeit der mittleren Innenraumtemperaturen im Wohnzimmer der einzelnen Sanierungsvarianten

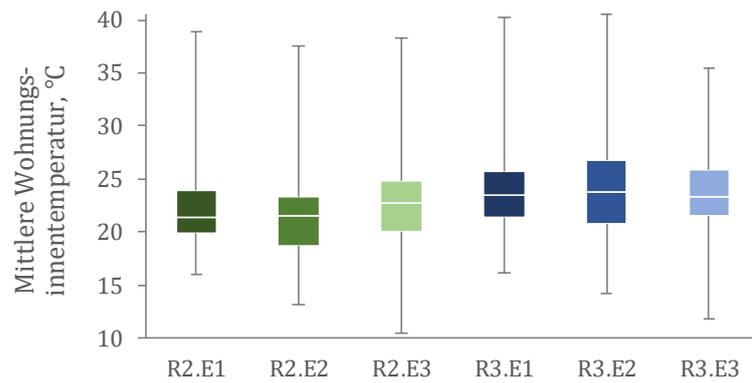


Abb. 13-14: Boxplot der auftretenden Wohnungsinnentemperaturen je Sanierungsvariante

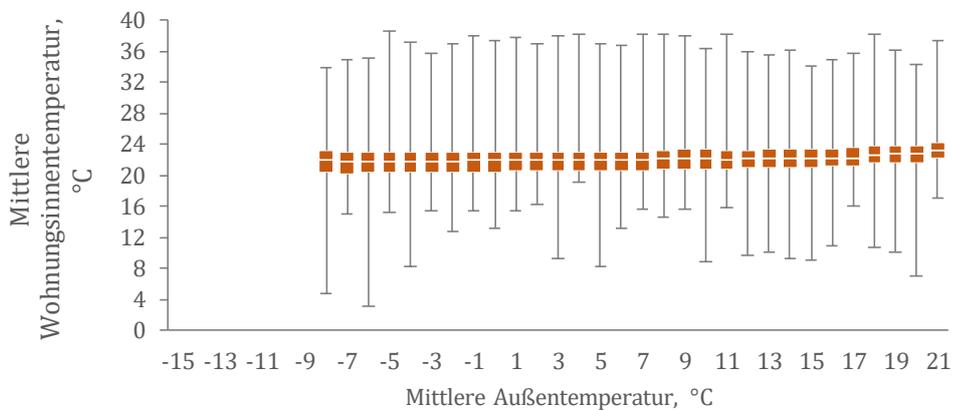


Abb. 13-15: Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Wohnungsinnentemperaturen bei gemessenen Außentemperaturen

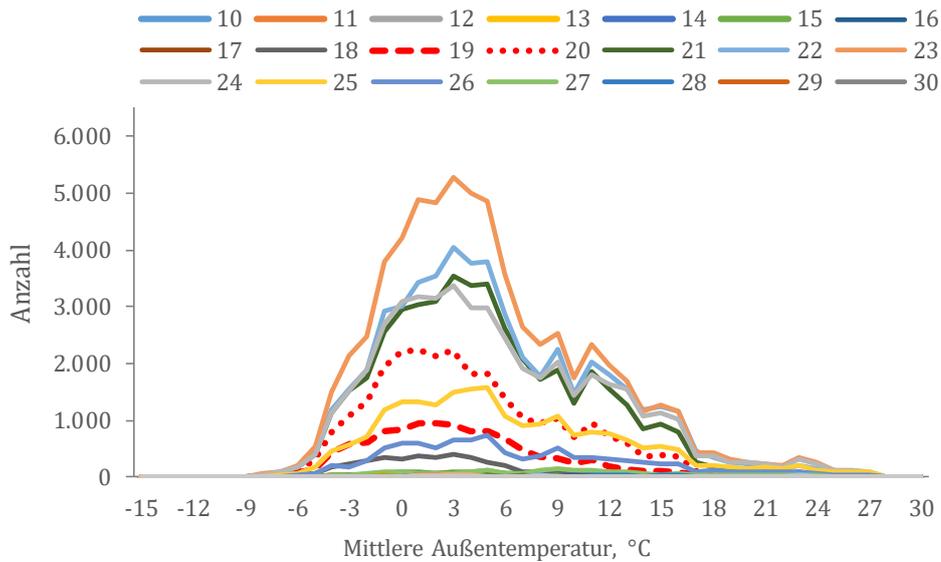


Abb. 13-16: Anzahl der vorhandenen Wohnungsinnentemperaturen bei unterschiedlichen Außentemperaturen

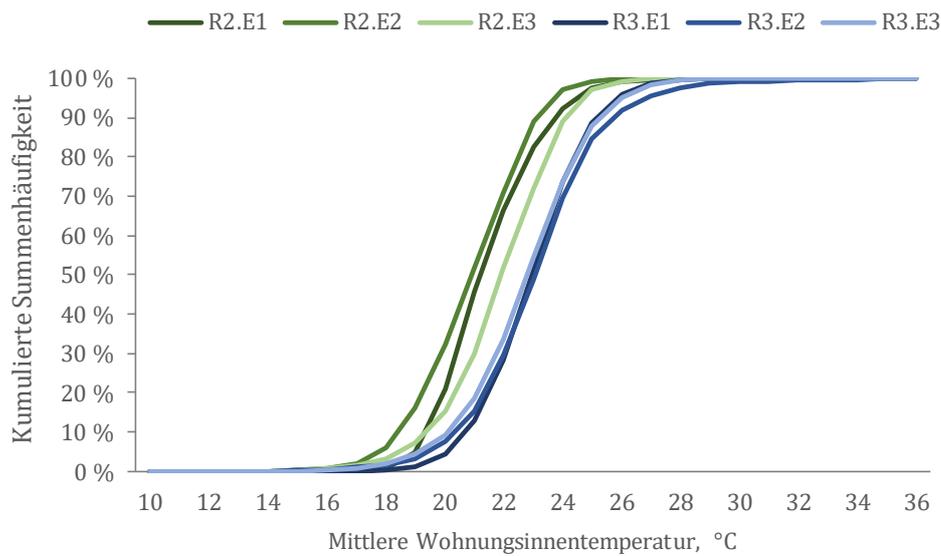


Abb. 13-17: Summenhäufigkeit der mittleren Wohnungsinnentemperaturen je Sanierungsvariante

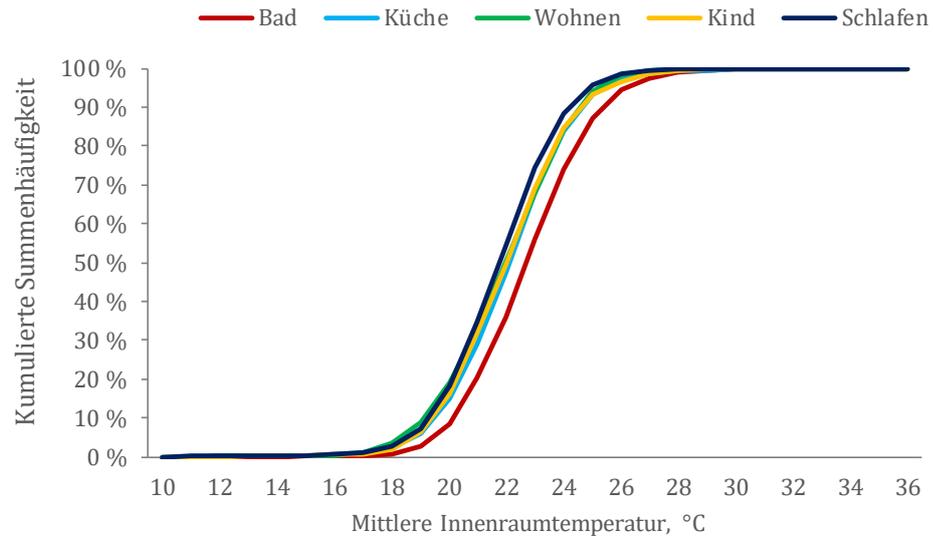


Abb. 13-18: Summenhäufigkeit der mittleren Wohnungsinnentemperaturen je Raum

13.3 Lüftungsverhalten während der Heizperiode 2012

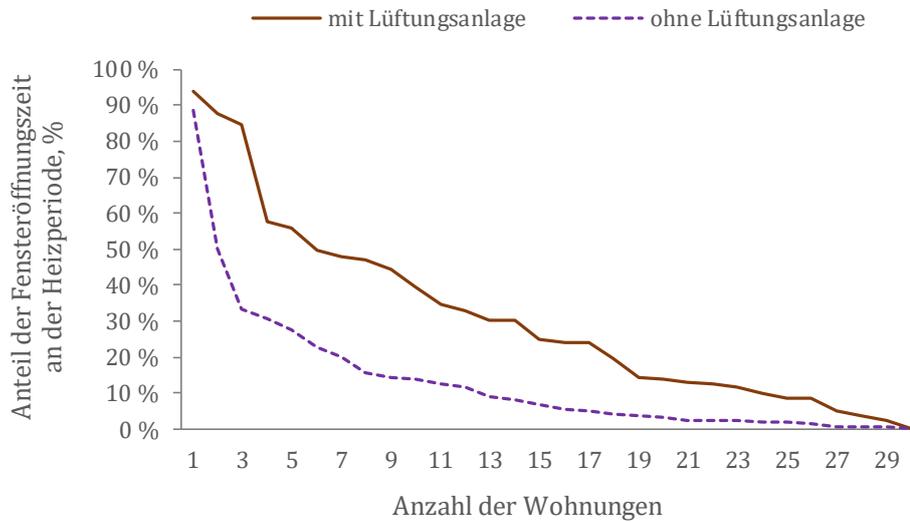


Abb. 13-19: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Bad je Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage

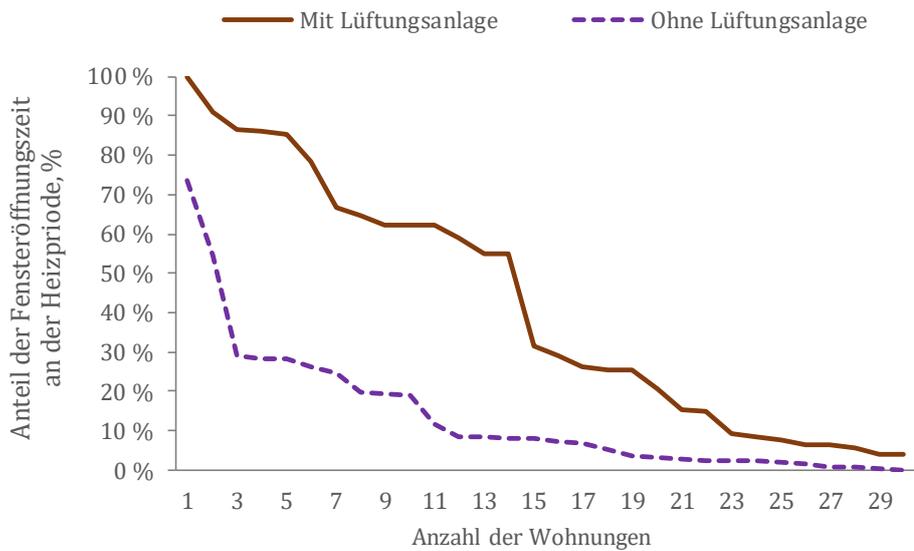


Abb. 13-20: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten in der Küche pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage

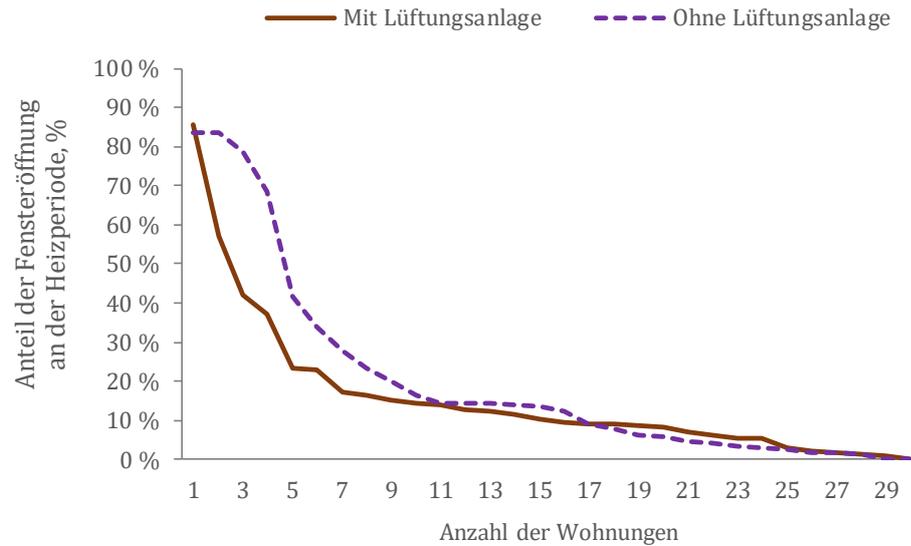


Abb. 13-21: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Wohnzimmer pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage

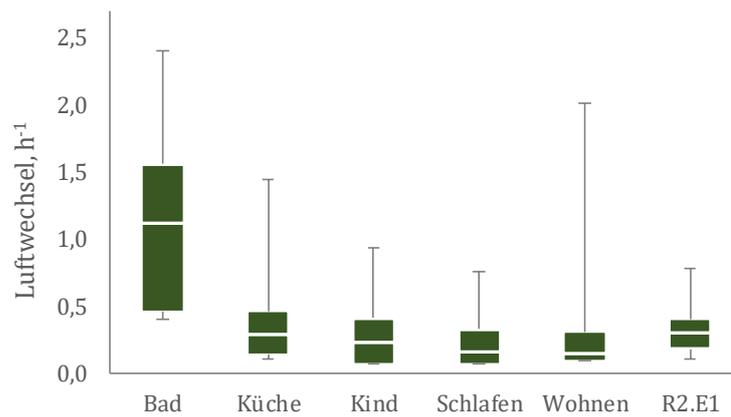


Abb. 13-22: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R2.E1

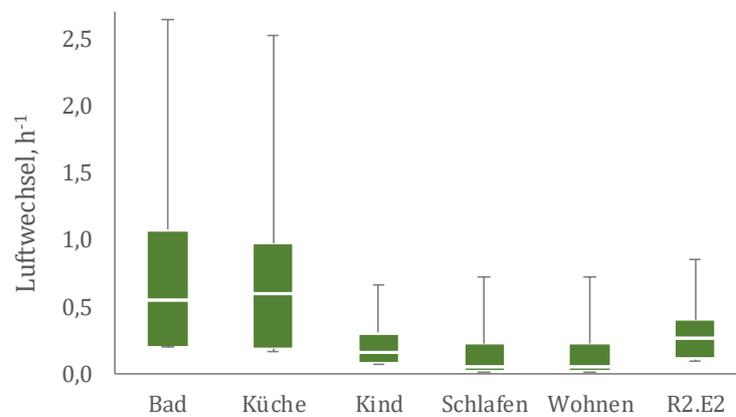


Abb. 13-23: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R2.E2

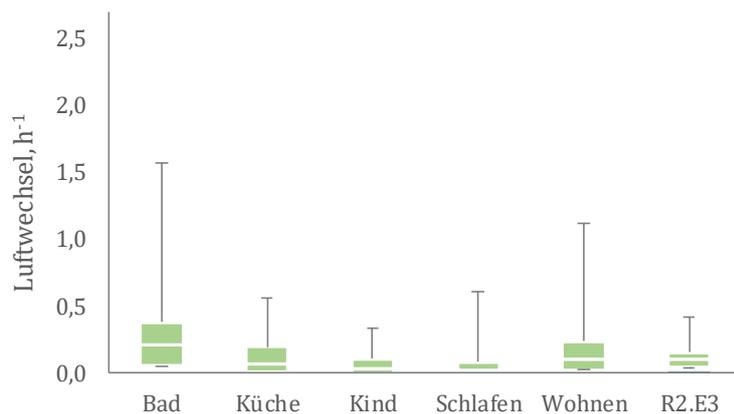


Abb. 13-24: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R2.E3

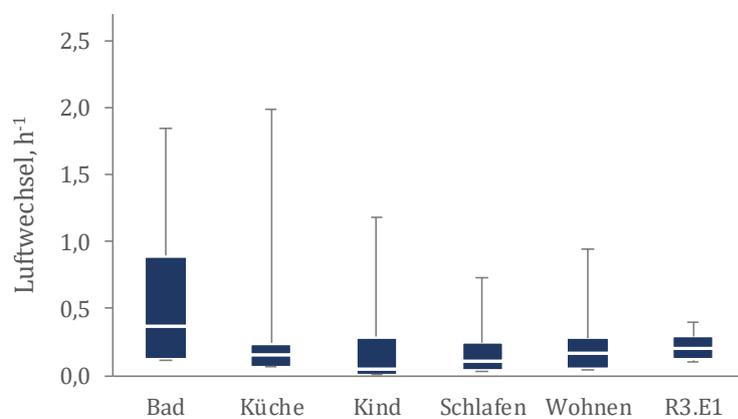


Abb. 13-25: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R3.E1

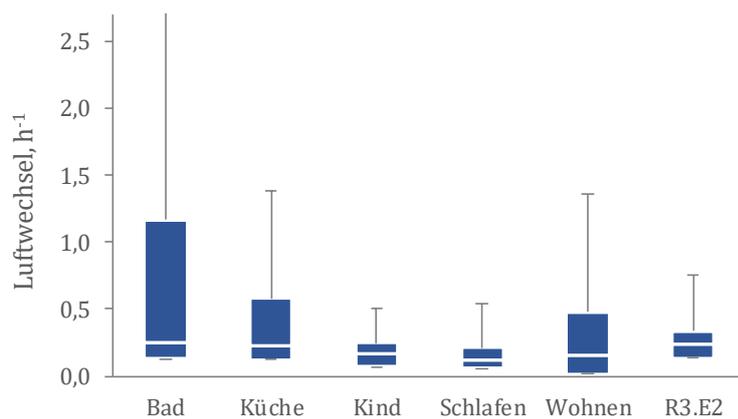


Abb. 13-26: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R3.E2

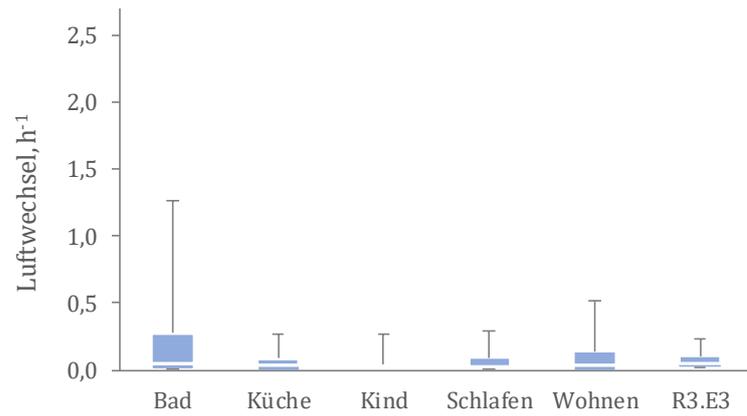


Abb. 13-27: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Raum und Eingang für R3.E3

13.4 Lüftungsverhalten während der Heizperiode 2013

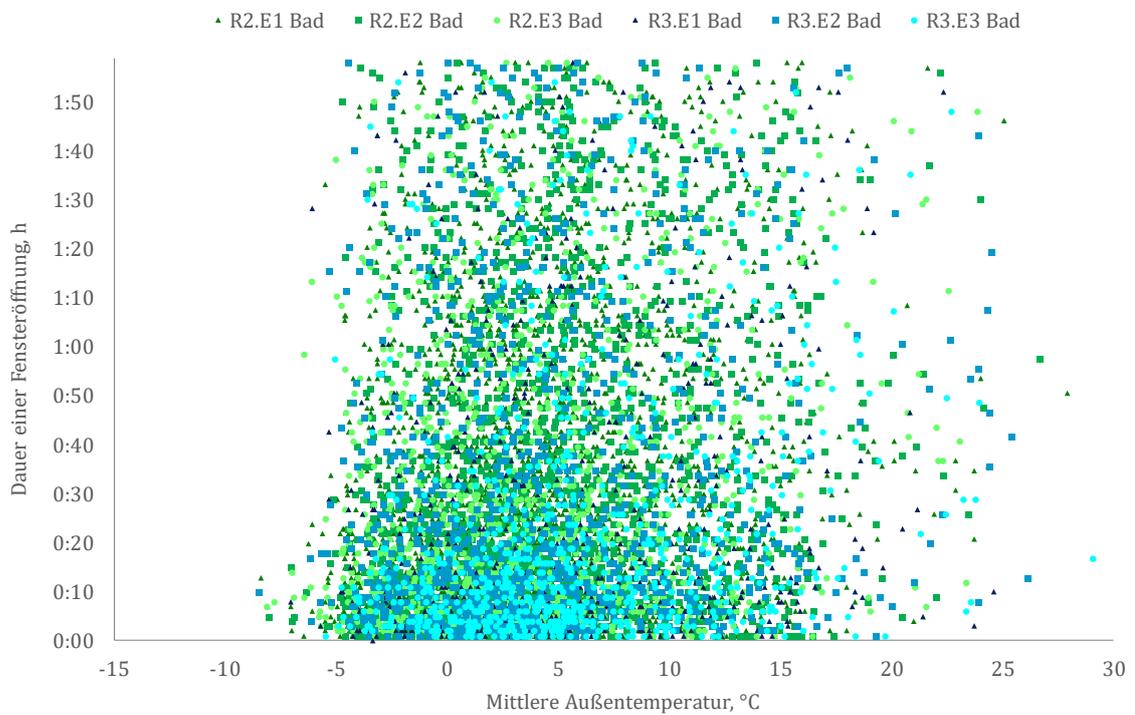


Abb. 13-28: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern im Badezimmer für alle Sanierungsvarianten bei mittleren Außentemperaturen

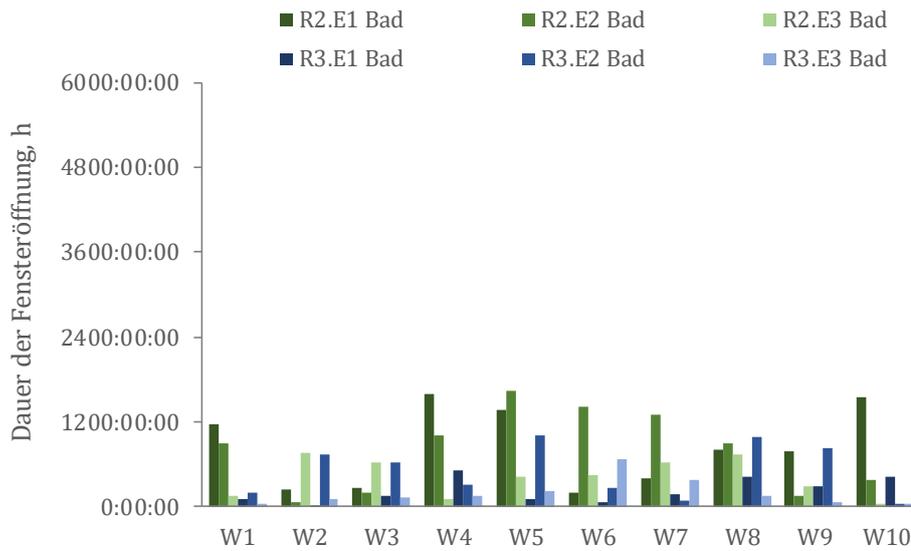


Abb. 13-29: Dauer der Fensteröffnung pro Bad je Wohnung und Sanierungsvariante

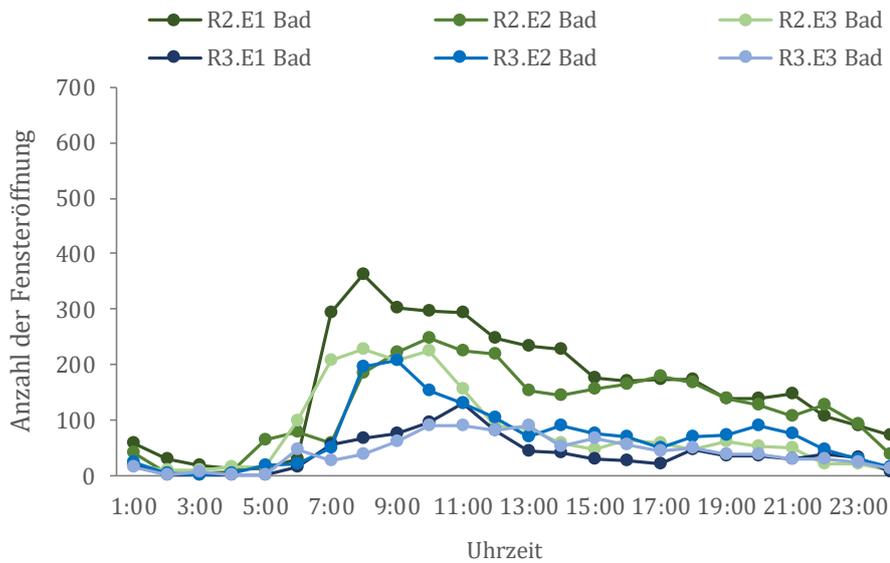


Abb. 13-30: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge pro Bad je Sanierungsvariante

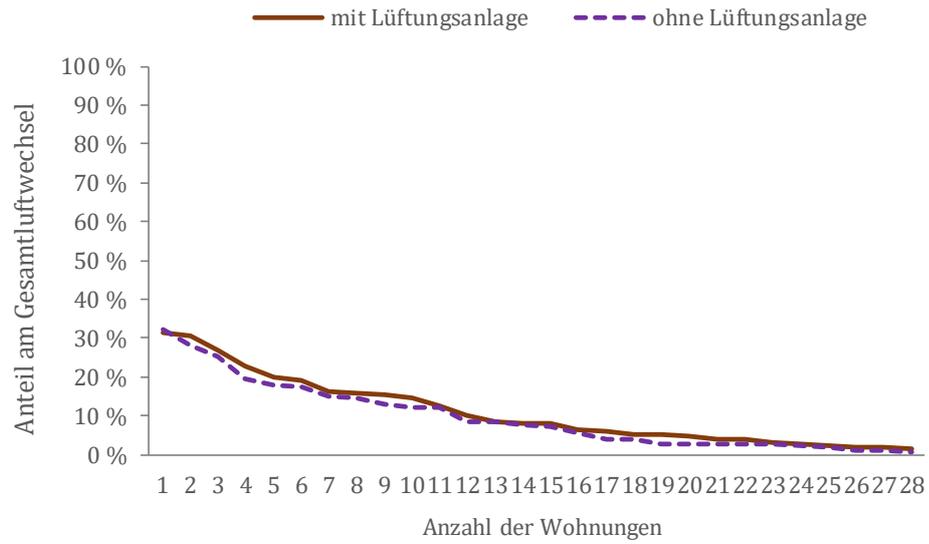


Abb. 13-31: Gegenüberstellung des Fensteröffnungsverhaltens für das Badezimmer mit und ohne Lüftungsanlage

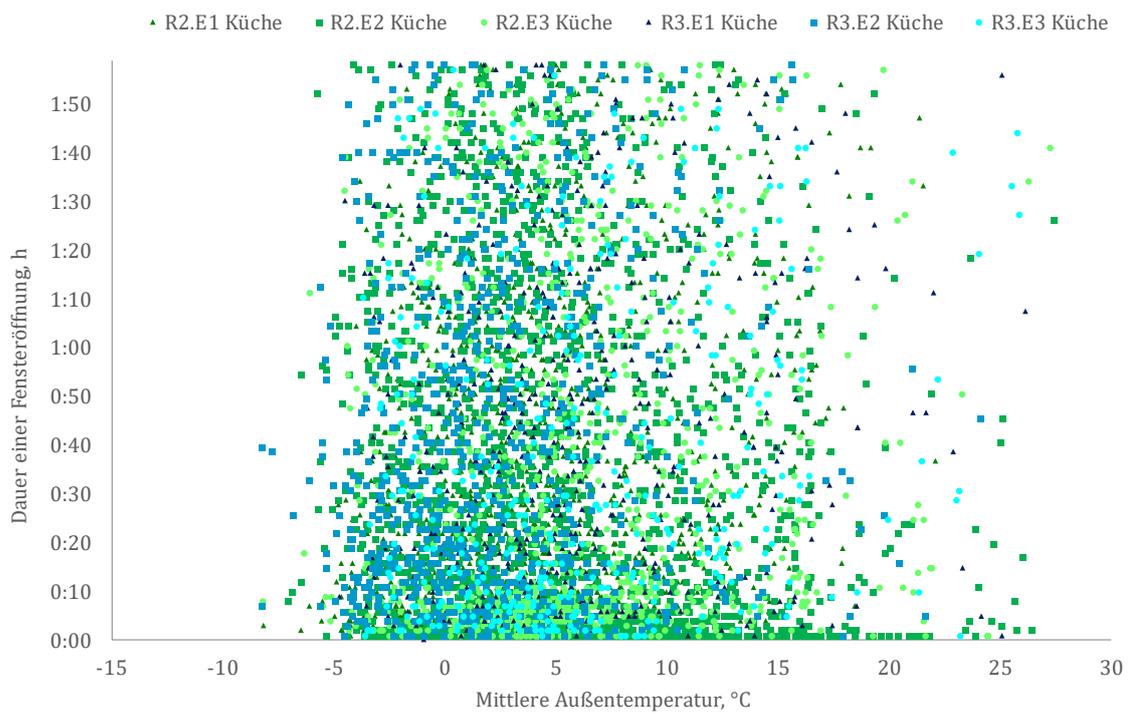


Abb. 13-32: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten in der Küche für jede Sanierungsvariante bei mittleren Außentemperaturen

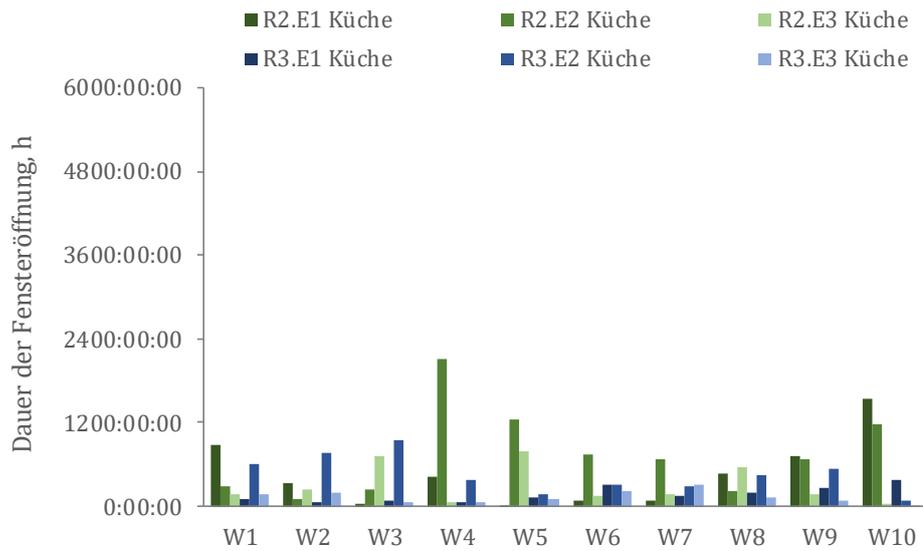


Abb. 13-33: Dauer der Fensteröffnung pro Küche je Wohnung und Sanierungsvariante

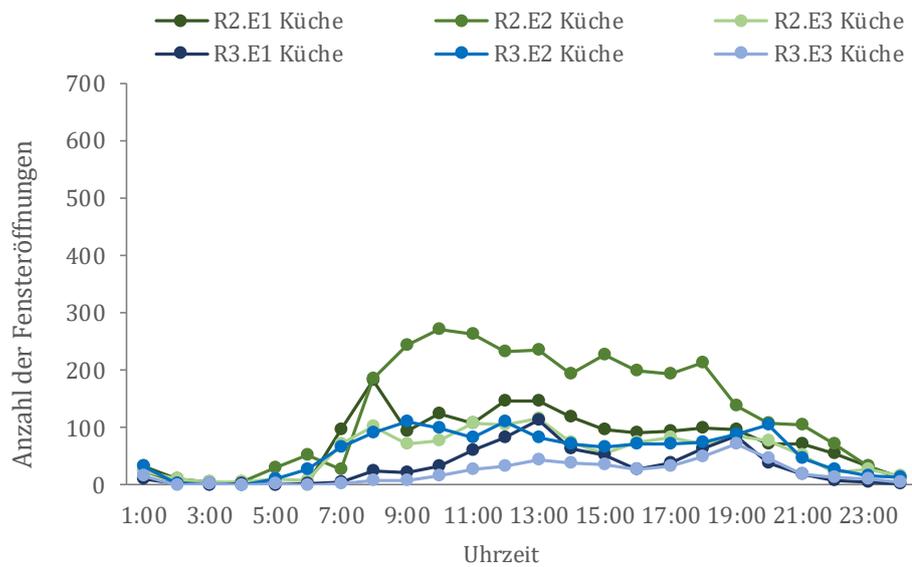


Abb. 13-34: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge pro Küche je Sanierungsvariante

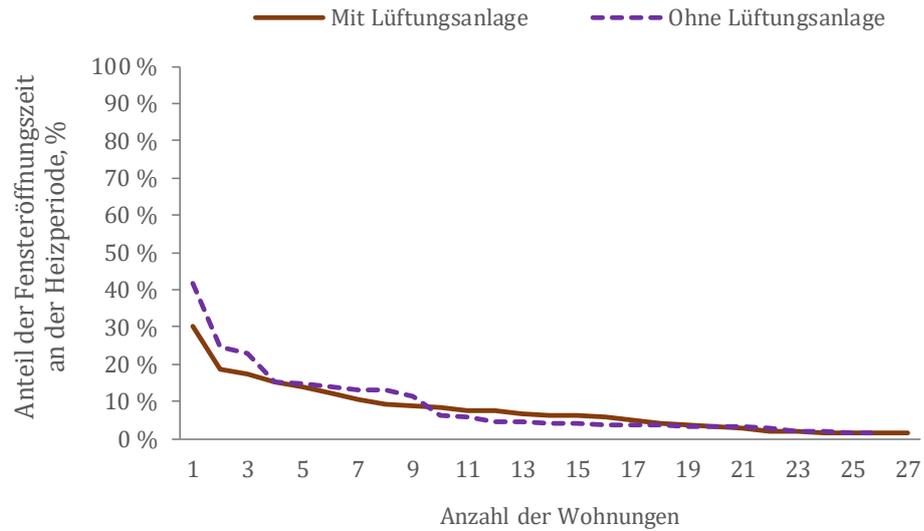


Abb. 13-35: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten in der Küche pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage

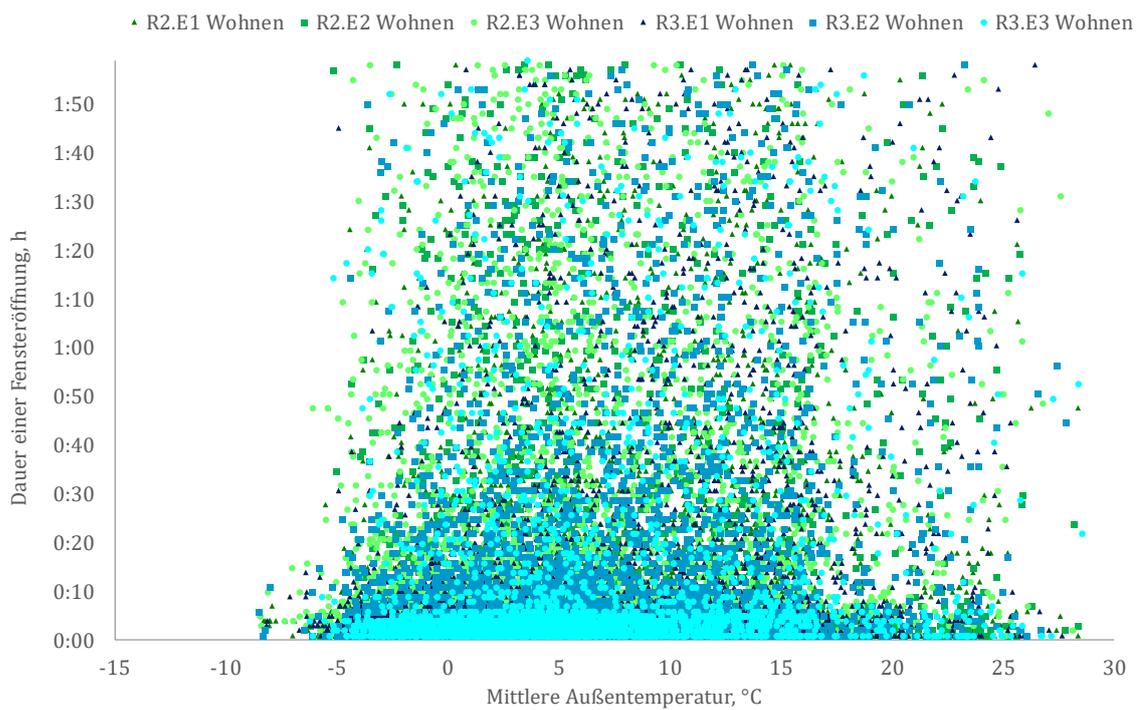


Abb. 13-36: Gegenüberstellung der Fensteröffnungsdauern im Wohnzimmer für alle Sanierungsvarianten bei mittleren Außentemperaturen

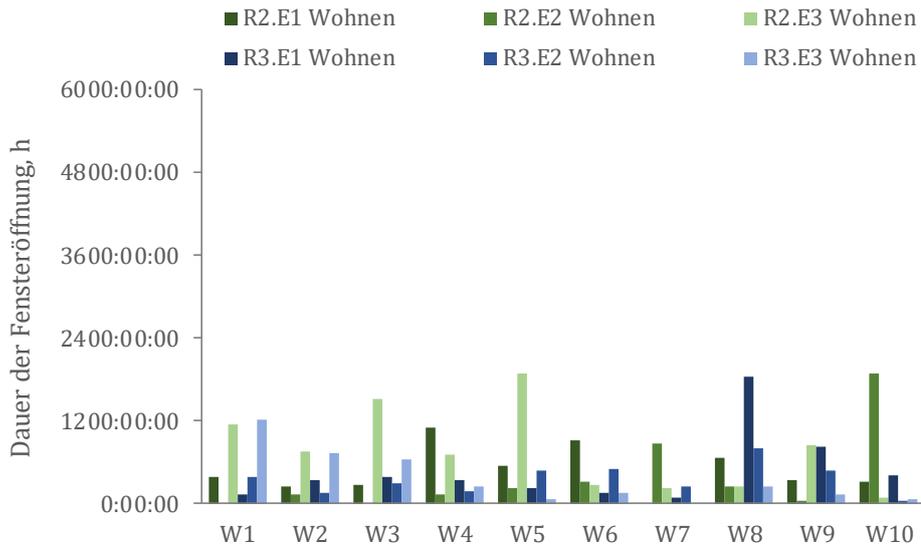


Abb. 13-37: Dauer der Fensteröffnung pro Wohnzimmer je Wohnung und Sanierungsvariante

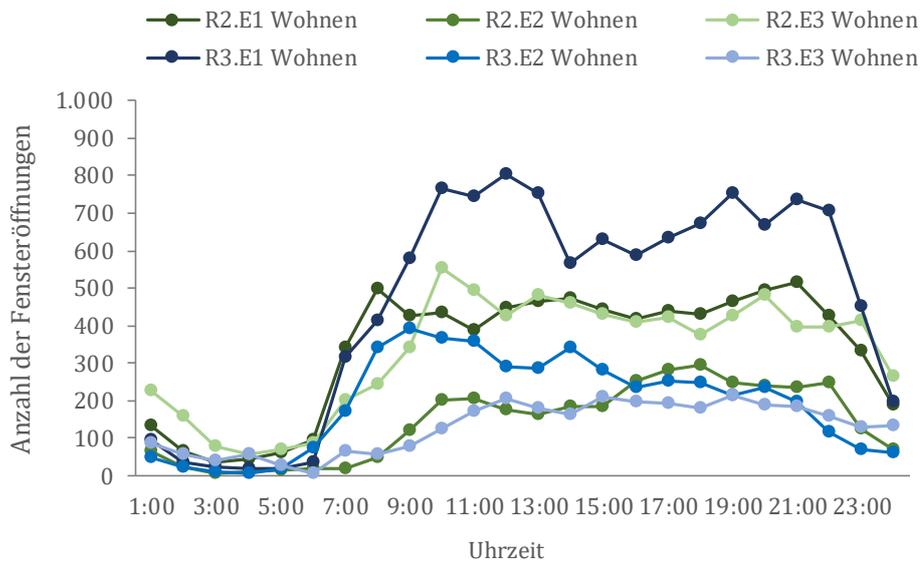


Abb. 13-38: Anzahl der Fensteröffnungsvorgänge pro Wohnzimmer je Sanierungsvariante

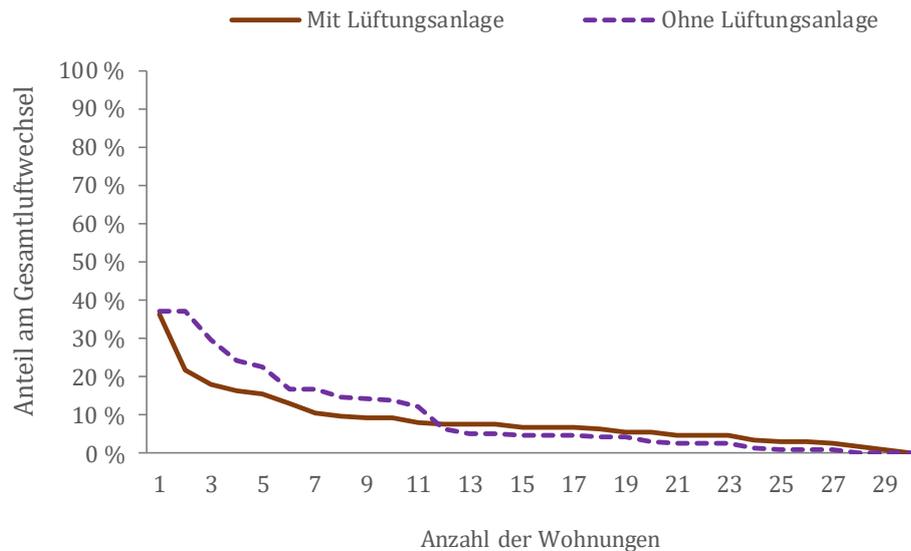


Abb. 13-39: Gegenüberstellung der Fensteröffnungszeiten im Wohnzimmer pro Wohnung mit und ohne Lüftungsanlage

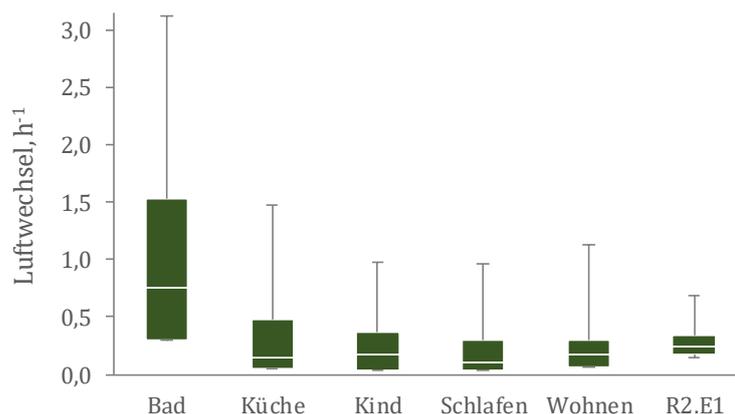


Abb. 13-40: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R2.E1

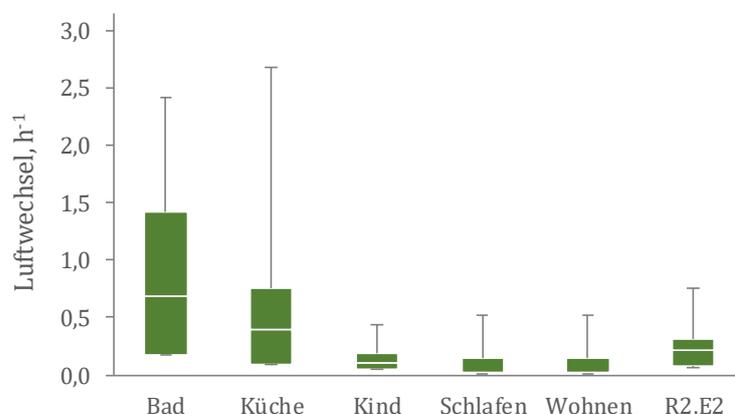


Abb. 13-41: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R2.E2

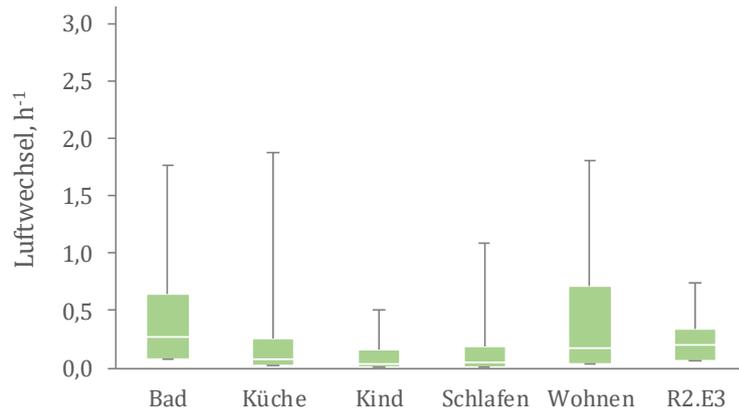


Abb. 13-42: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R2.E3

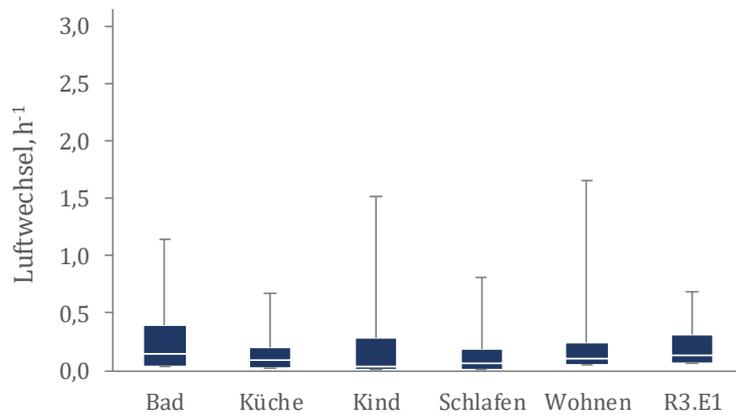


Abb. 13-43: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R3.E1

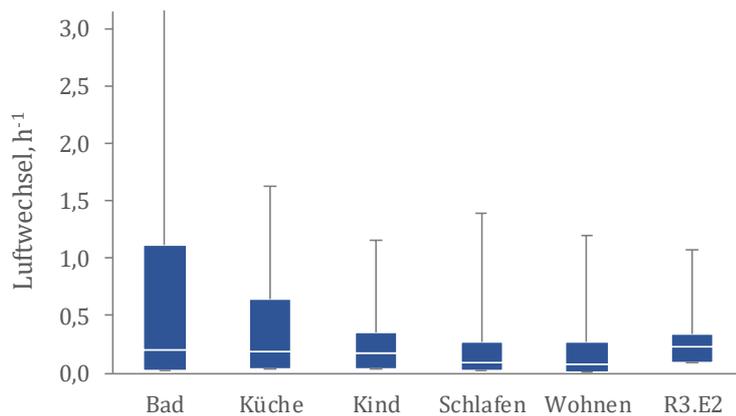


Abb. 13-44: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R3.E2

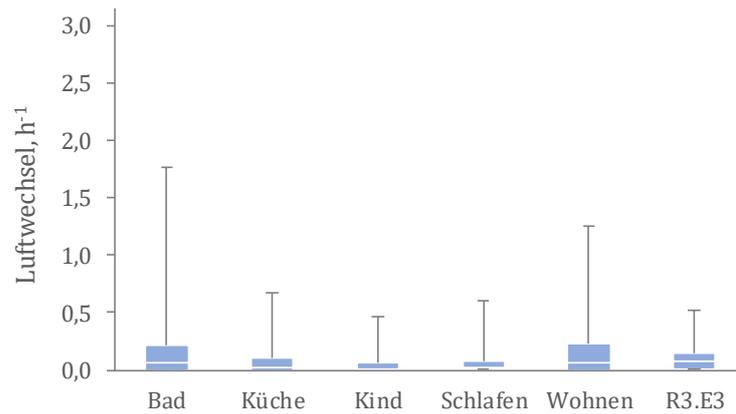


Abb. 13-45: Gegenüberstellung des Luftwechsels pro Raum für R3.E3

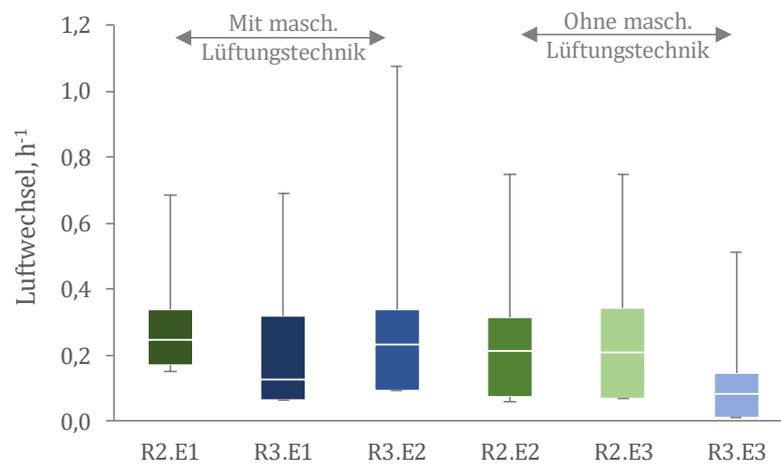


Abb. 13-46: Gegenüberstellung der Luftwechselraten pro Sanierungsvariante

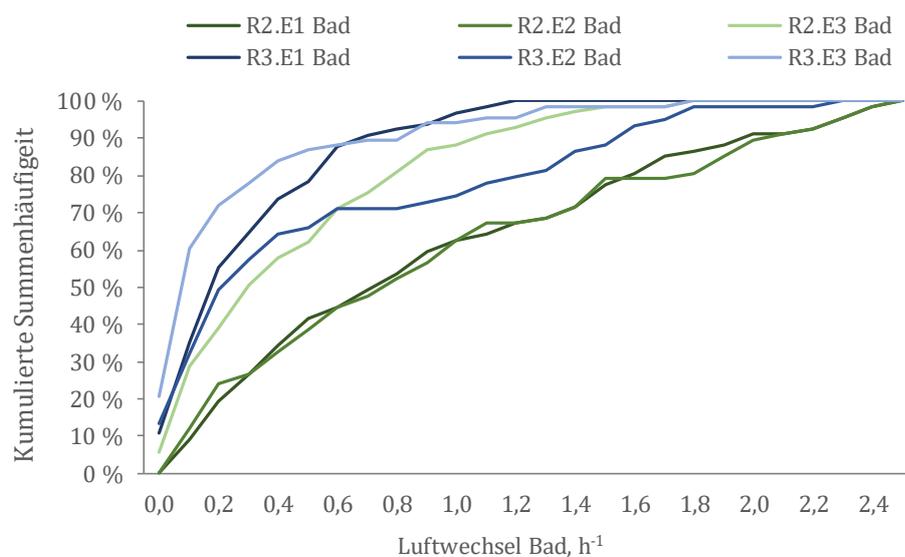


Abb. 13-47: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für das Bad je Sanierungsvariante

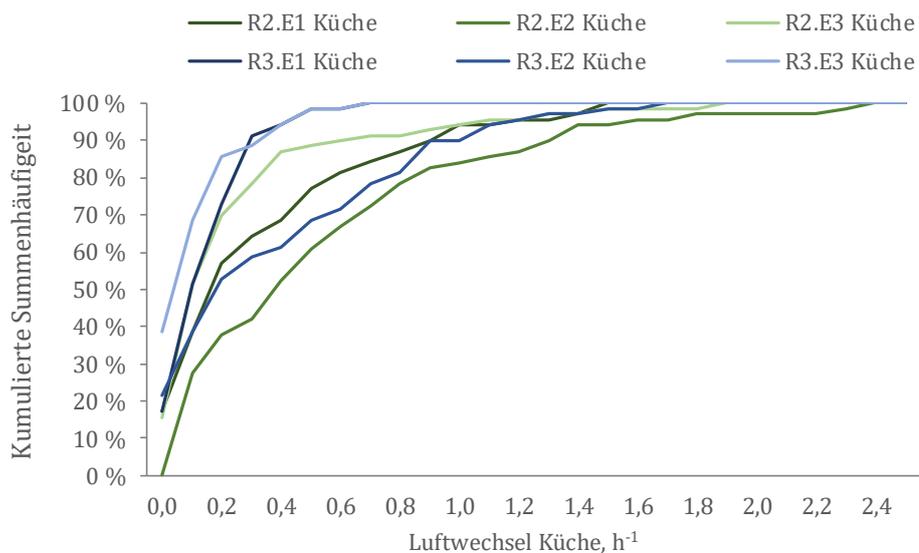


Abb. 13-48: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für die Küche je Sanierungsvariante

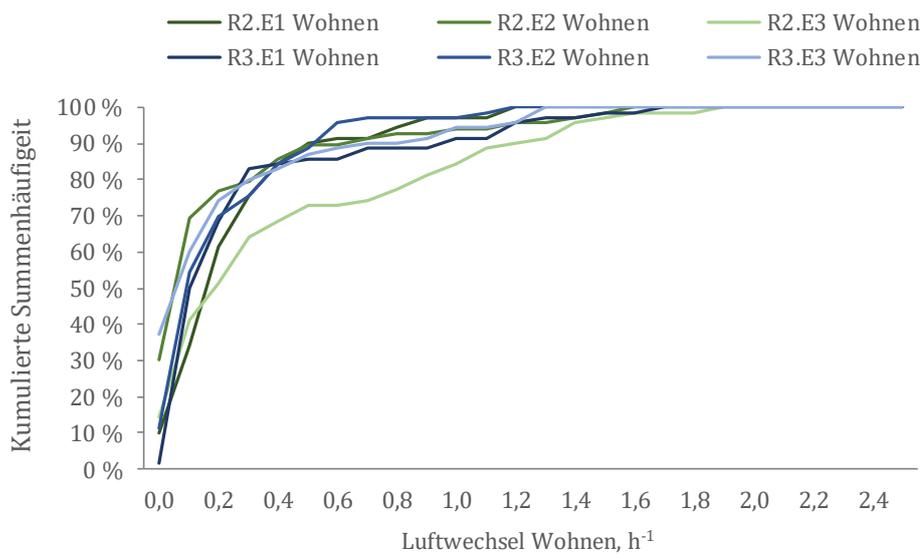


Abb. 13-49: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für das Wohnzimmer je Sanierungsvariante

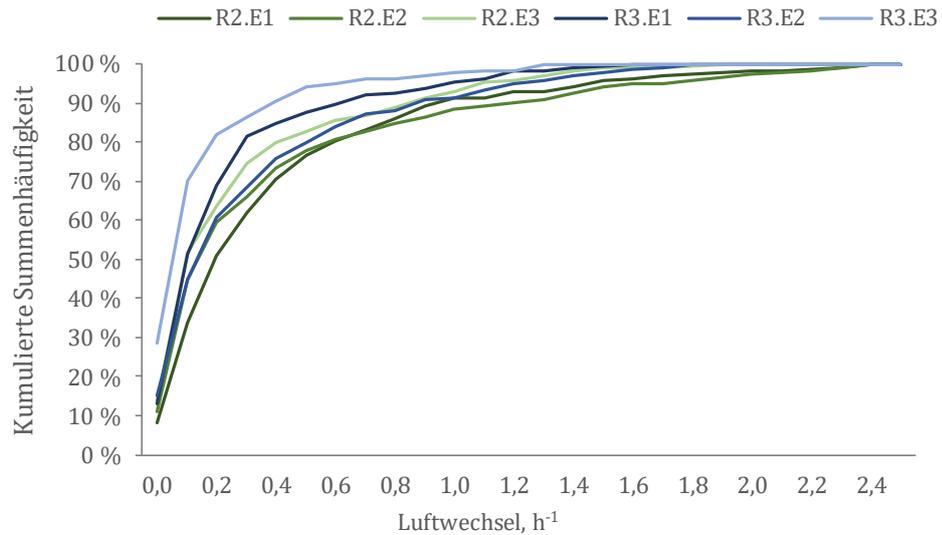


Abb. 13-50: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit der Luftwechselraten für die einzelnen Sanierungsvarianten

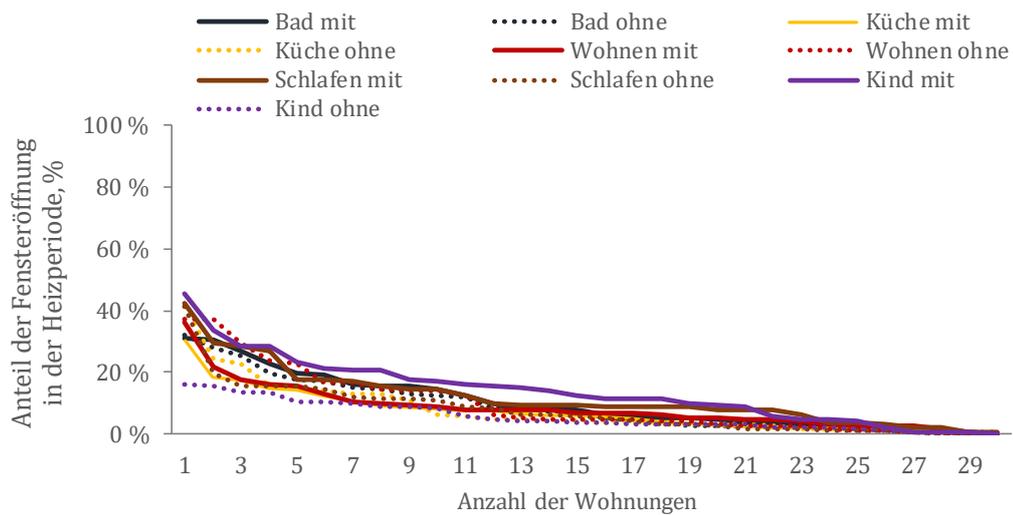


Abb. 13-51: Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit für die jeweiligen Räume unterschieden nach Sanierungsvariante mit und ohne Lüftungsanlage

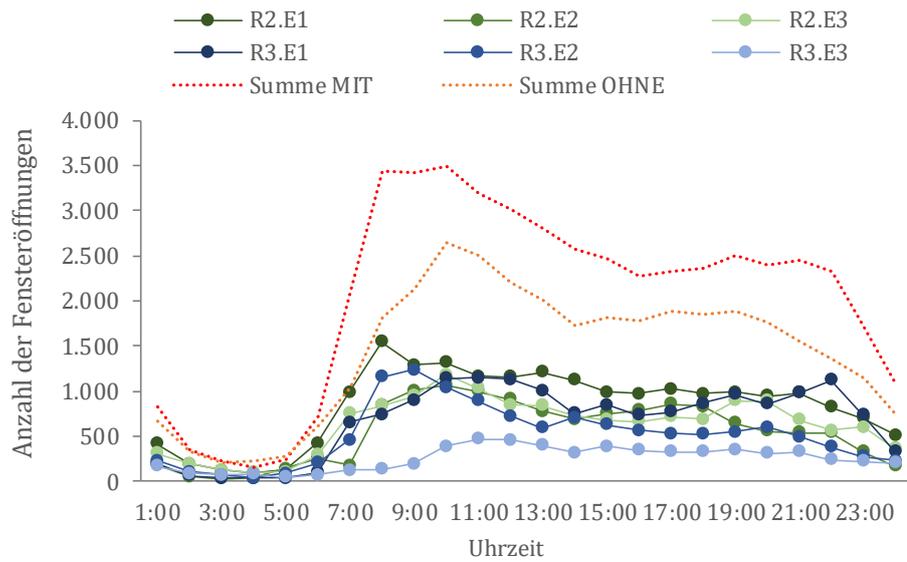


Abb. 13-52: Anzahl der Fensteröffnungen pro Uhrzeit für die einzelnen Sanierungsvarianten sowie mit und ohne Lüftungsanlage

13.5 Trinkwarmwasserverbrauch im Jahr 2012

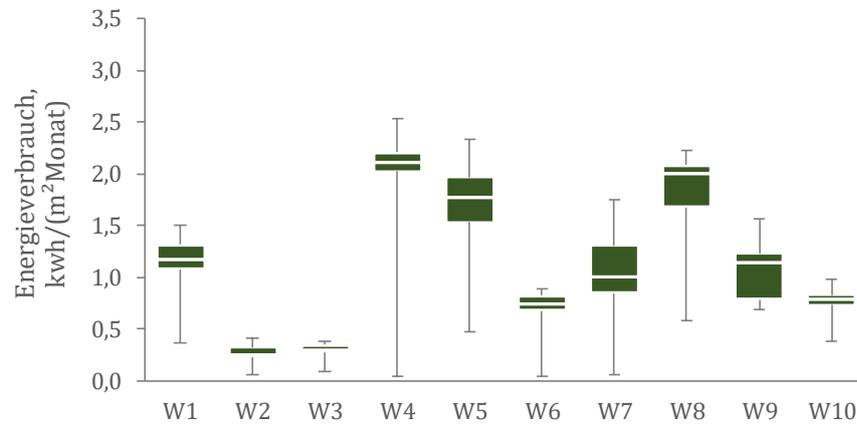


Abb. 13-53: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R2.E1

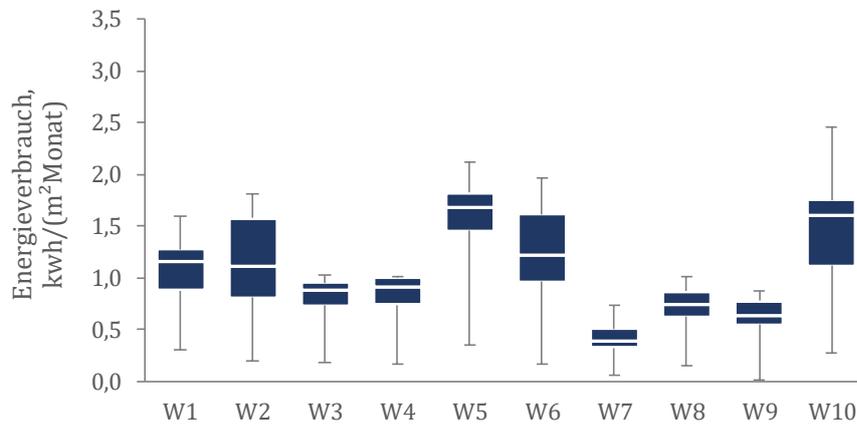


Abb. 13-54: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E1

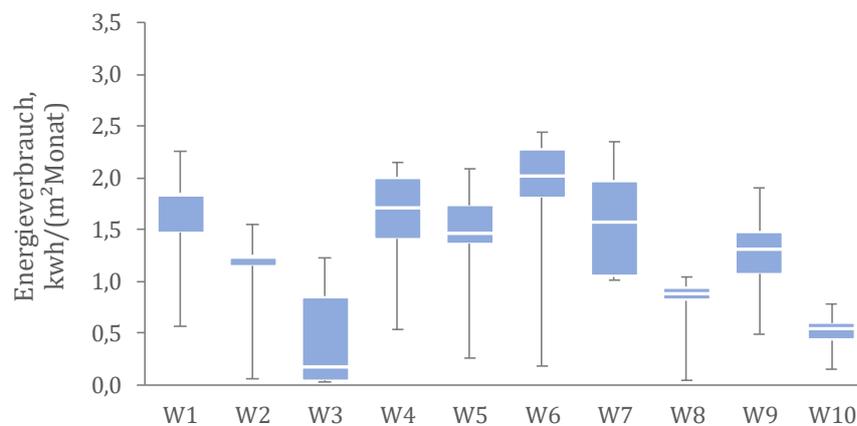


Abb. 13-55: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E2

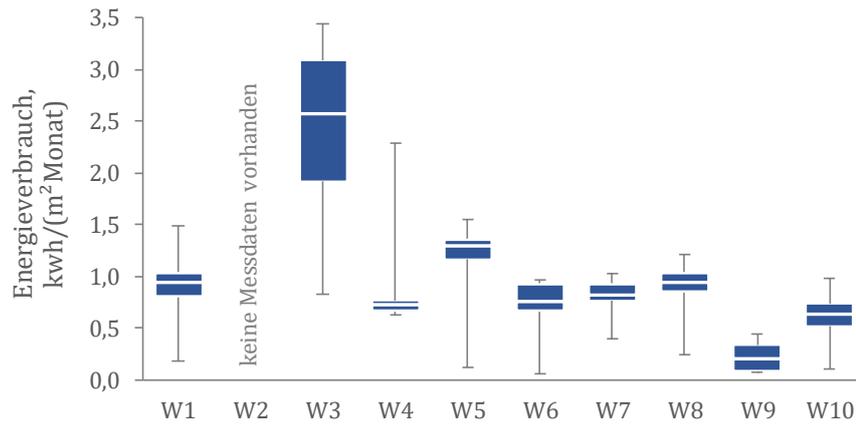


Abb. 13-56: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E3

13.6 Trinkwarmwasserverbrauch im Jahr 2013

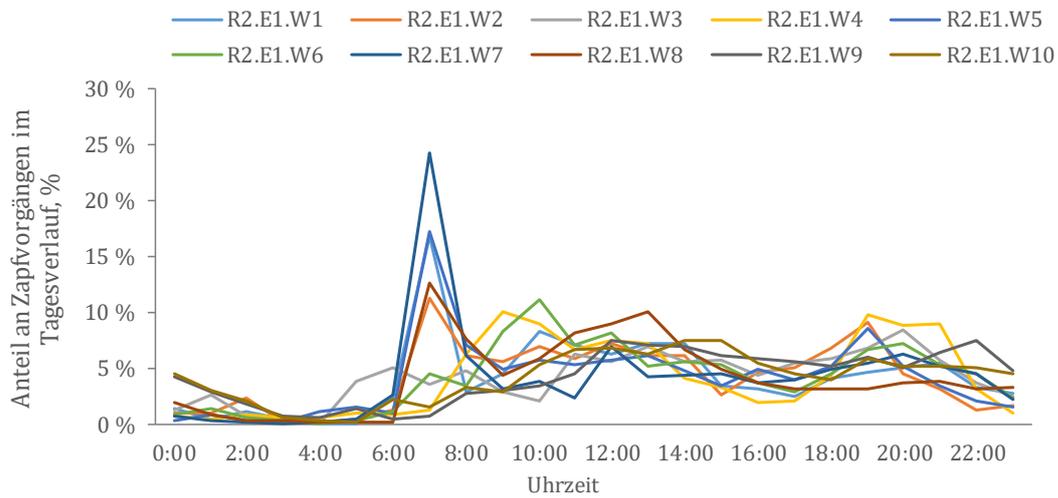


Abb. 13-57: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R2.E1

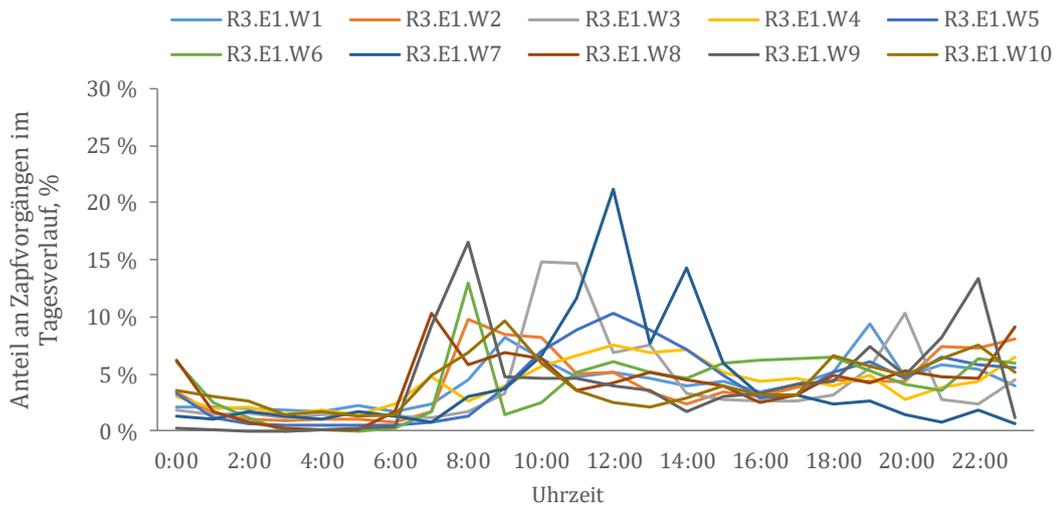


Abb. 13-58: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E1

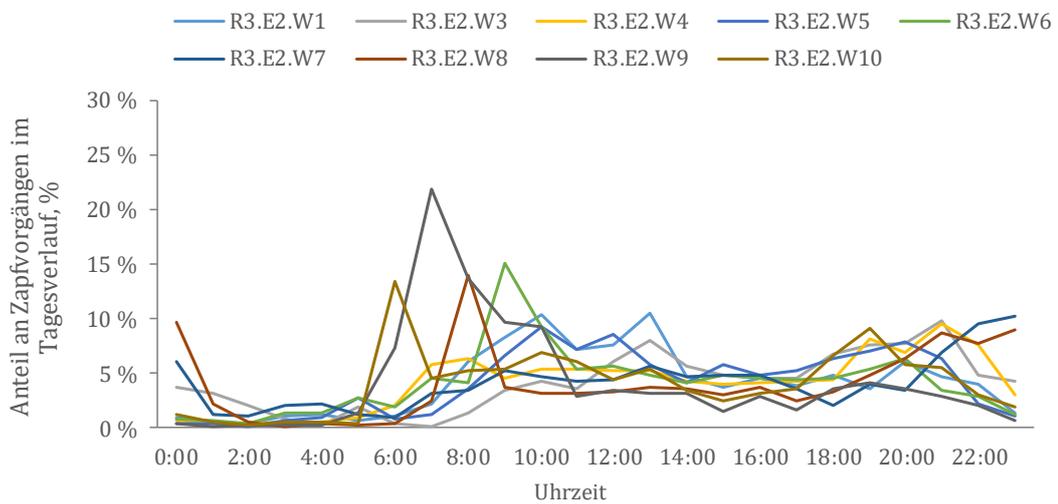


Abb. 13-59: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E2

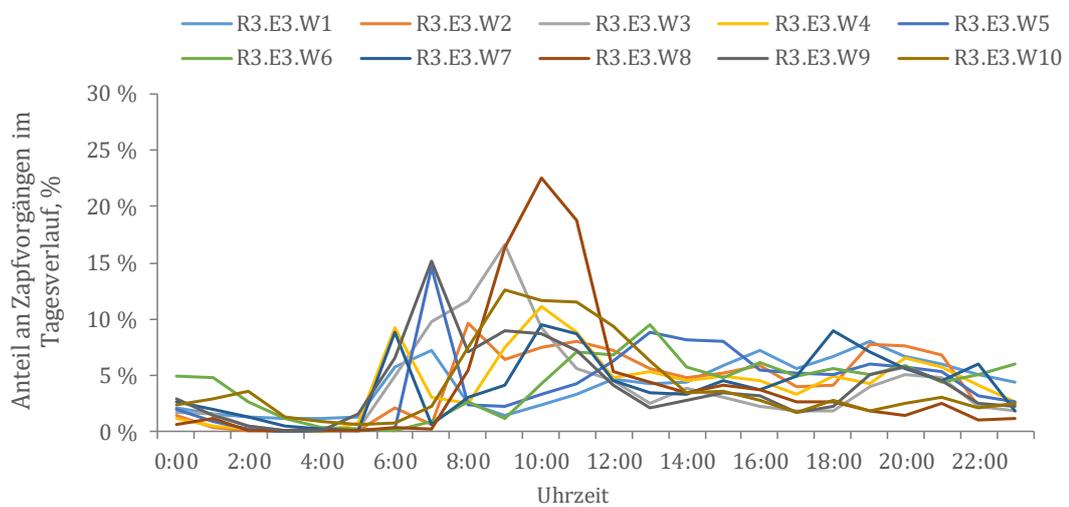


Abb. 13-60: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens der einzelnen Wohnungen von R3.E3

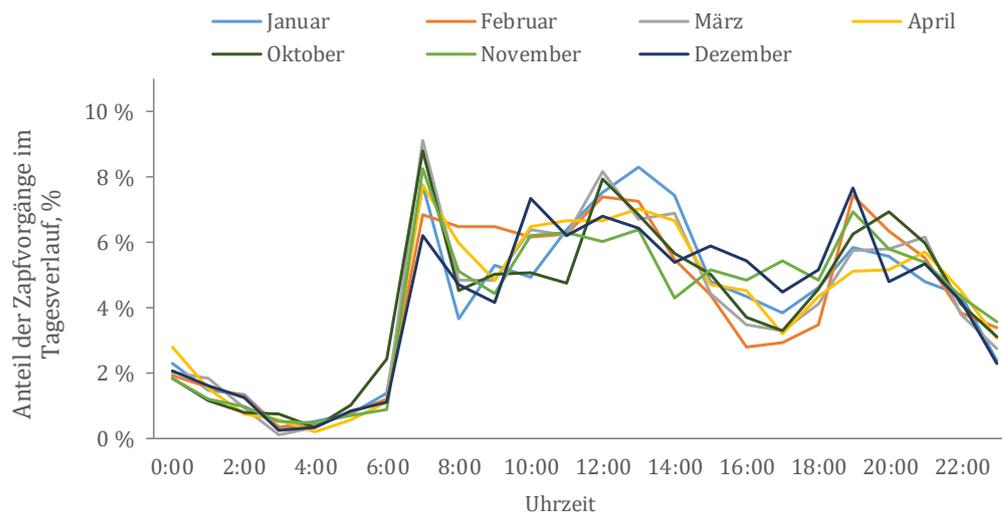


Abb. 13-61: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R2.E1 pro Monat der Heizperiode 2013

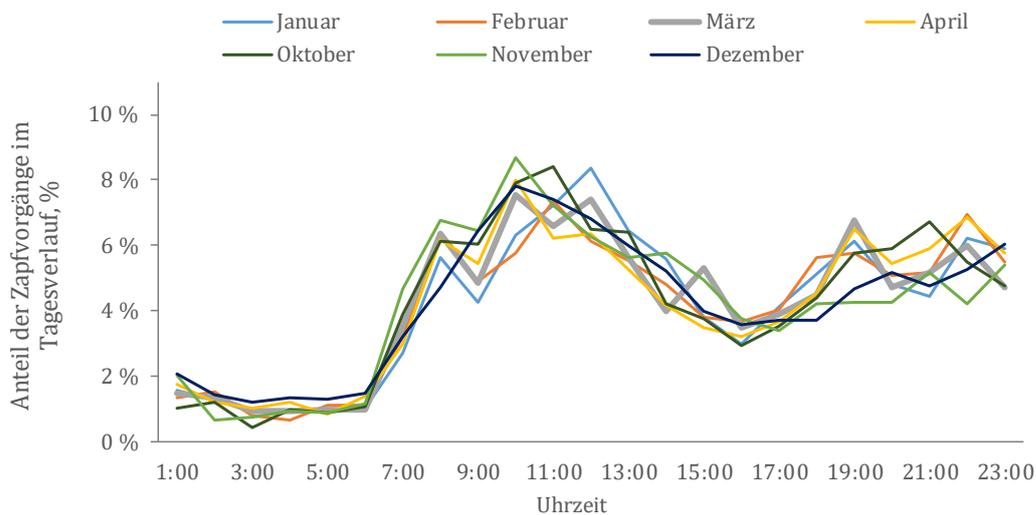


Abb. 13-62: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E1 pro Monat der Heizperiode 2013

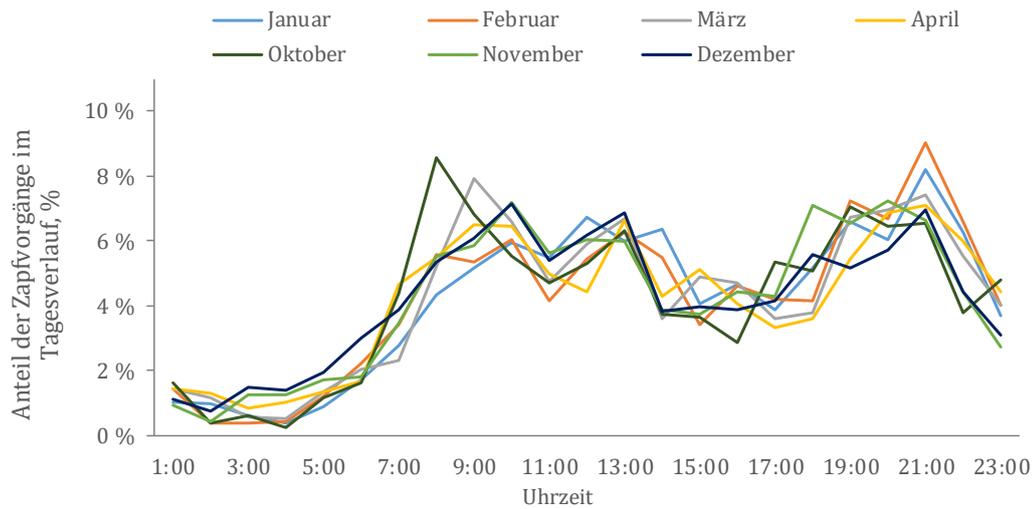


Abb. 13-63: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E2 pro Monat der Heizperiode 2013

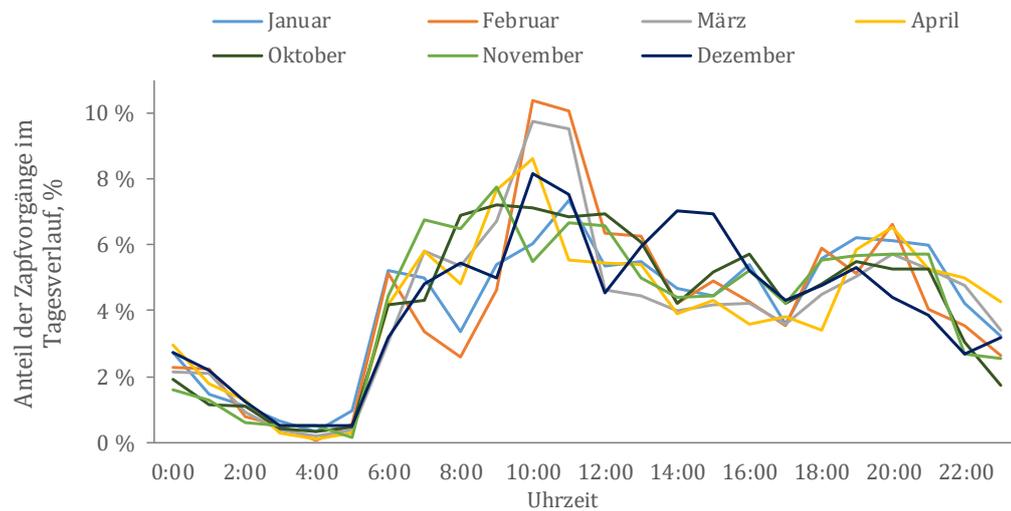


Abb. 13-64: Gegenüberstellung des Zapfverhaltens von R3.E3 pro Monat der Heizperiode 2013

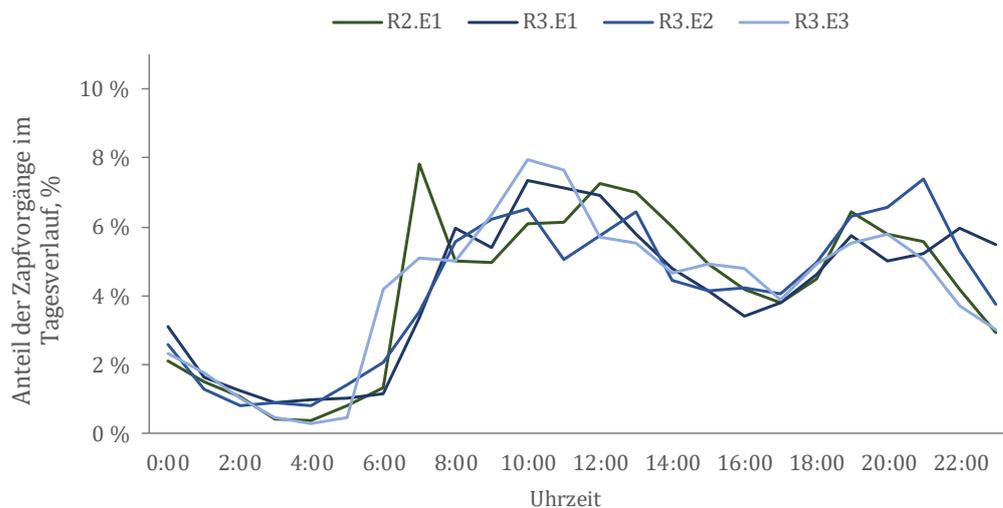


Abb. 13-65: Gegenüberstellung der einzelnen Sanierungsvarianten und deren Zapfverhalten über den Tag während der Heizperiode 2013

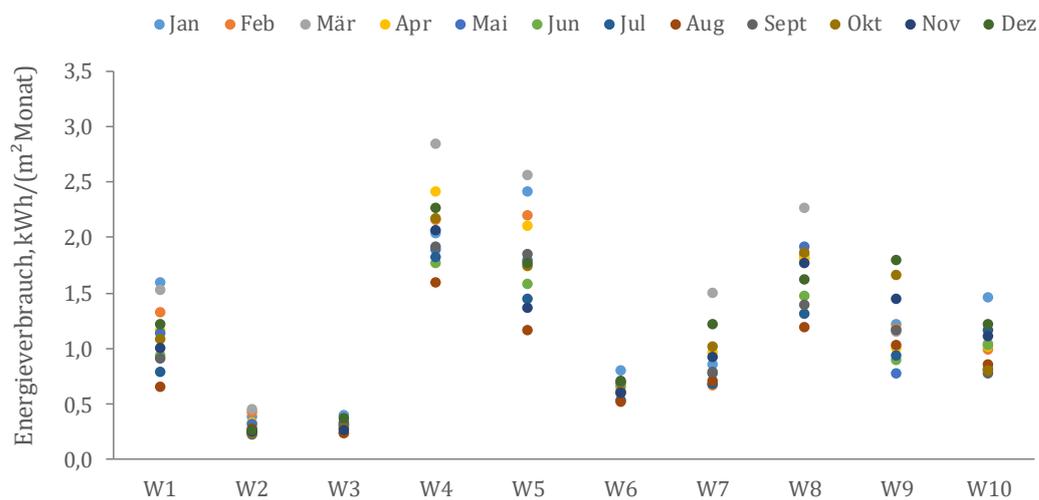


Abb. 13-66: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R2.E1 im Jahr 2013

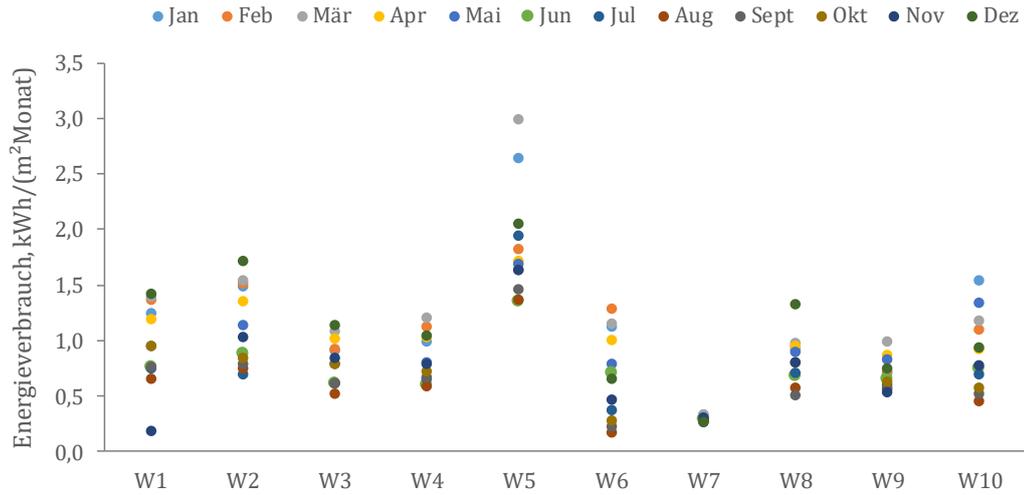


Abb. 13-67: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E1 im Jahr 2013

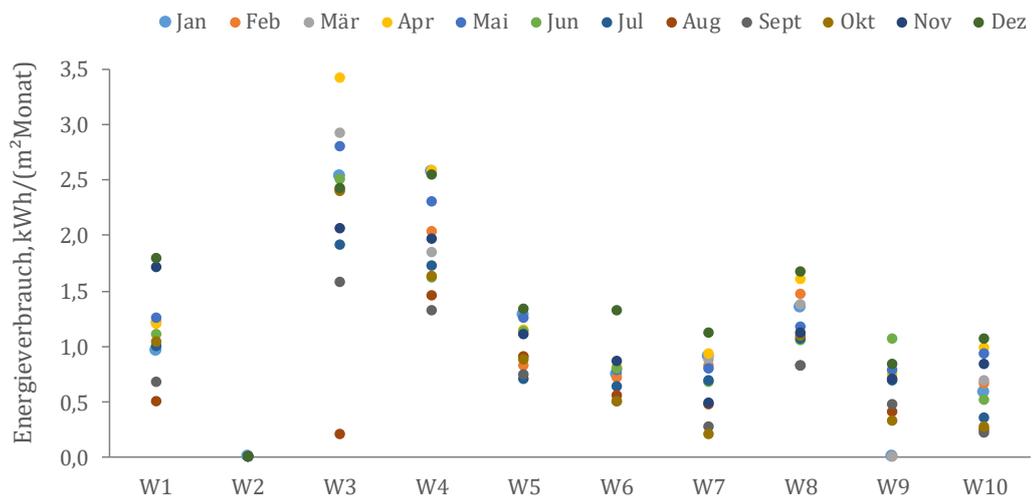


Abb. 13-68: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E2 im Jahr 2013

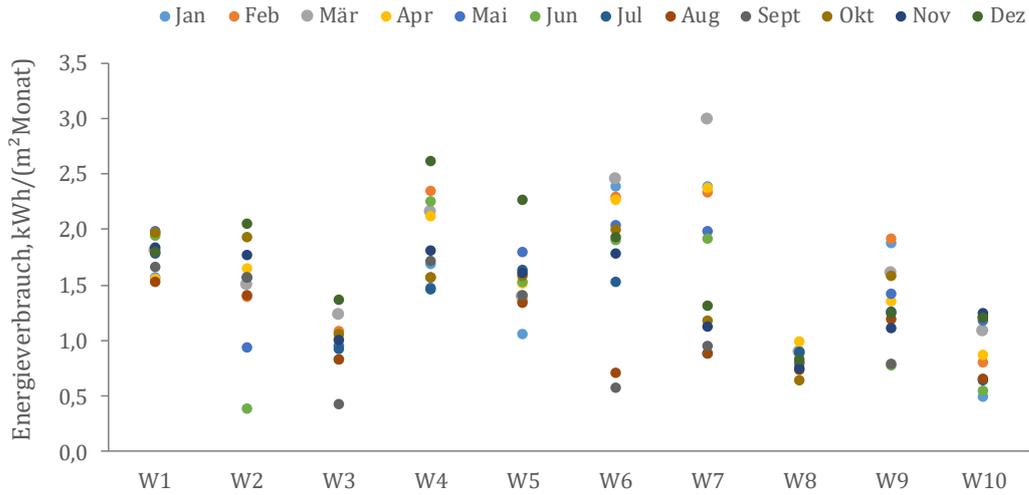


Abb. 13-69: Monatlicher Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen von R3.E3 im Jahr 2013

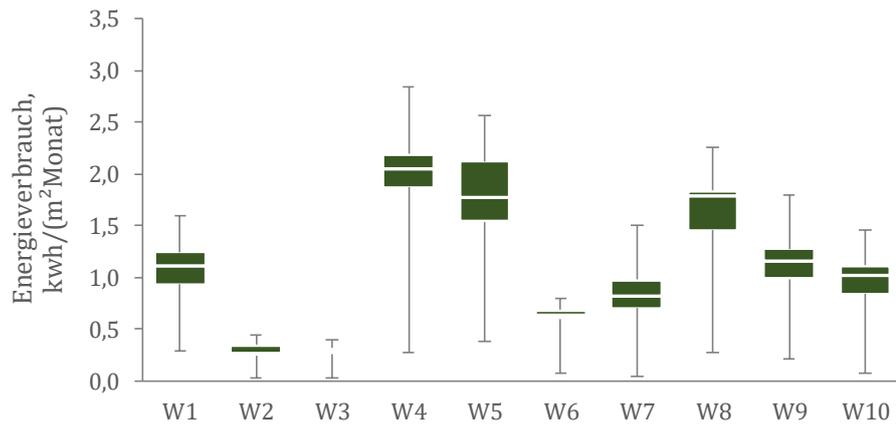


Abb. 13-70: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R2.E1

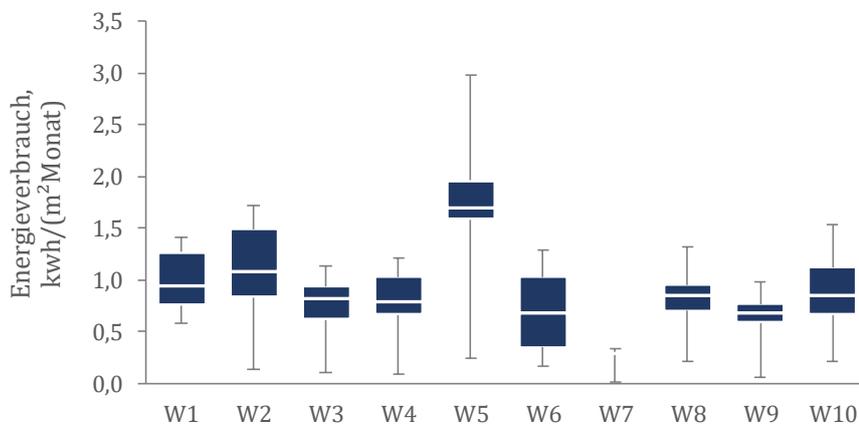


Abb. 13-71: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E1

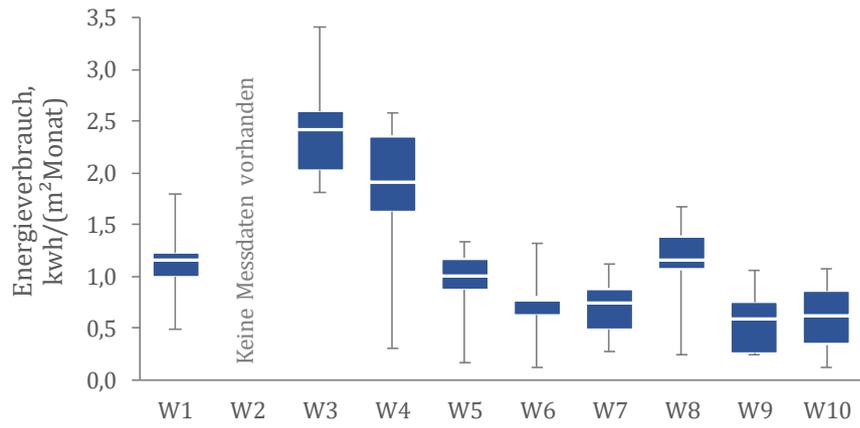


Abb. 13-72: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E2

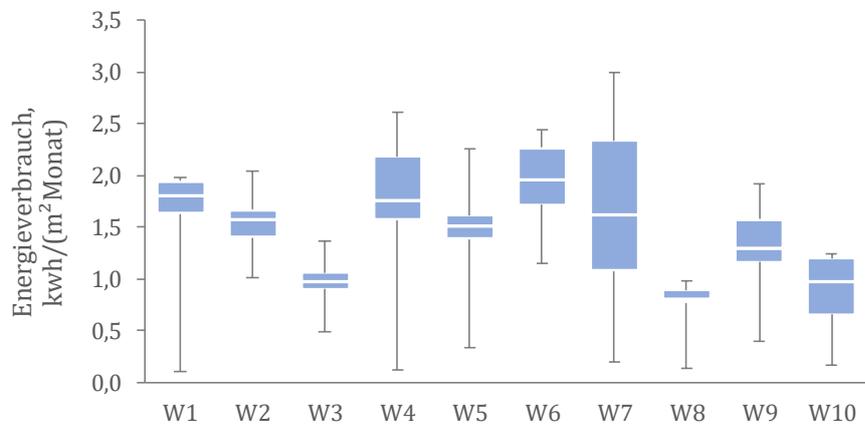


Abb. 13-73: Varianz des Energieverbrauchs pro Wohnung des Riegels R3.E3