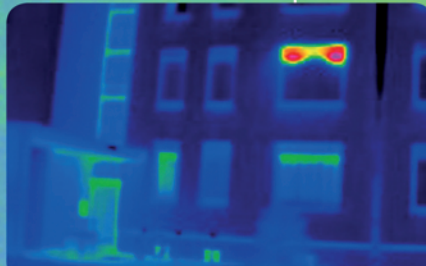


Davide Cali, Florian Heesen, Tanja Osterhage, Rita Streblow, Reinhard Madlener, Dirk Müller

# Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen



Davide Calì, Florian Heesen, Tanja Osterhage, Rita Streblow,  
Reinhard Madlener, Dirk Müller

# **Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen**



Davide Calì, Florian Heesen, Tanja Osterhage, Rita Streblow,  
Reinhard Madlener, Dirk Müller

## **Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen**

## Impressum

### Herausgeber:

Begleitforschung EnEff:Stadt  
c/o pro:21 GmbH  
Dresdner Straße 1 · D-10179 Berlin  
Tel.: +49 30 3904222 · Fax: +49 30 3904231  
Dr. Armand Dütz (V.i.S.d.P.), Jessica Löffler  
E-Mail: a.duetz@pro-21.de

Dieses Buch wurde von den Bearbeitern des Forschungsvorhabens „Auswirkungen des Reboundeffekts bei der Sanierung von Bestandsgebäuden“ (BMWf Förderkennziffer 03ET1105A) und des Forschungsvorhabens „Analyse des Energieverbrauchsverhaltens der Bewohner von energieeffizienten Wohngebäuden“ (BMWf Förderkennziffer 03ET4004) geschrieben.

Im Einzelnen zeichnen die Autoren für folgende Kapitel verantwortlich:

#### **RWTH Aachen University**

#### **Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, EBC**

Kapitel 3, 4, 6, 7: Davide Calí, Tanja Osterhage, Rita Streblow, Dirk Müller

#### **RWTH Aachen University**

#### **Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior, FCN**

Kapitel 1, 2, 5, 7: Florian Heesen, Reinhard Madlener  
Studentische Mitarbeiterin: Cathrin Werkmeister

### **Lektorat und Gestaltung:**

löwenholz kommunikation GbR, Berlin  
Rüdiger Buchholz, Claudia Oly

### **Titelbilder:**

E.ON ERC Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate

### **Druck:**

BELTZ, Bad Langensalza

Bonn, 2016

ISBN (Print): 978-3-8167-9633-6  
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9634-3

### **Verlag und Vertrieb:**

Fraunhofer IRB Verlag  
Fraunhofer-Informationszentrum  
Raum und Bau IRB  
Nobelstraße 12 · 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 7 11 9 70-25 00 · Fax: +49 7 11 9 70-25 08  
irb@irb.fraunhofer.de · www.baufachinformation.de

## Schriftenreihe EnEff:Stadt

Diese Publikation wird herausgegeben im Rahmen der Schriftenreihe EnEff:Stadt. In dieser werden fortlaufend die für Fachwelt und Praxis besonders relevanten Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Forschungsinitiative EnEff:Stadt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWf) veröffentlicht.

Bislang erschienen:

- Der Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere
- Energetische Stadtraumtypen
- Integrales Quartiers-Energiekonzept Karlsruhe-Rintheim
- Energetische Bilanzierung von Quartieren Ergebnisse und Benchmarks aus Pilotprojekten – Forschung zur Energieeffizienten Stadt
- Planungshilfsmittel: Praxiserfahrungen aus der energetischen Quartiersplanung
- Energetischer Stadtumbau. Energieleitplanung und Wärmenetze für neue Nachbarschaften in Ludwigsburg Grünbühl-Sonnenberg
- Der energieeffiziente Universitätscampus: Pilotprojekte der Forschungsinitiative EnEff:Stadt
- Vision 2020. Die Plusenergiegemeinde Wüstenrot
- Energieeinsparpotenzial sanierter Wohngebäude unter Berücksichtigung realer Nutzungsbedingungen
- Nichttechnische Erfolgsfaktoren der Quartiersentwicklung

Neuerscheinungen werden fortlaufend über die Website der Förderinitiative ([www.eneff-stadt.info](http://www.eneff-stadt.info)) im Bereich Begleitforschung angekündigt.

# Inhalt

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Abbildungsverzeichnis                                                                           | 7         |
| Tabellenverzeichnis                                                                             | 9         |
| Abkürzungen und Nomenklatur                                                                     | 10        |
| Vorwort zur Schriftenreihe                                                                      | 15        |
| <b>1 Energieeffizienz vor dem Hintergrund des weltweit ansteigenden Primärenergieverbrauchs</b> | <b>17</b> |
| <b>2 Herleitung der Begriffsdefinitionen</b>                                                    | <b>21</b> |
| 2.1 Rebound-Effekt und Performance Gap                                                          | 22        |
| 2.2 Wirkungsebene des Rebound-Effekts                                                           | 23        |
| 2.2.1 Direkter Rebound-Effekt                                                                   | 23        |
| 2.2.2 Indirekter Rebound-Effekt                                                                 | 23        |
| 2.2.3 Makroökonomischer Effekt                                                                  | 24        |
| 2.2.4 Einzeleffekte                                                                             | 24        |
| <b>3 Bewertungsmethoden</b>                                                                     | <b>26</b> |
| 3.1 Bedarfsberechnungen nach Energieeinsparverordnung (EnEV)                                    | 26        |
| 3.2 Energy Performance Gap und Primärenergieeinsparindex                                        | 28        |
| <b>4 Beschreibung des Feldversuchs</b>                                                          | <b>30</b> |
| 4.1 Gebäudebeschreibung                                                                         | 31        |
| 4.2 Die Sanierungsvarianten                                                                     | 31        |
| 4.2.1 Ertüchtigung der wärmeübertragenden Gebäudehülle                                          | 32        |
| 4.2.2 Sanierung der Anlagentechnik: Heizung und Lüftung                                         | 33        |
| 4.2.3 Sanierung der Anlagentechnik: Trinkwarmwasser                                             | 34        |
| 4.3 Das Monitoring-System                                                                       | 38        |
| 4.3.1 Messung des Energieverbrauchs für Erzeugung, Speicherung und Verteilung                   | 38        |
| 4.3.2 Messungen der Luftqualität und thermischen Behaglichkeit                                  | 39        |
| 4.3.3 Installierte Wetterstation                                                                | 40        |
| 4.4 Datenmanagement                                                                             | 41        |
| 4.4.1 Herstellung von HDF5-Dateien                                                              | 41        |
| 4.4.2 HDF5-Viewer zur Visualisierung und Analyse von Messdaten                                  | 41        |

|          |                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>Die Sicht der Bewohner/innen versus gemessener Energieverbrauch</b>                 | <b>43</b> |
| 5.1      | Mikroökonomische Grundzusammenhänge des Energieverbrauchsverhaltens                    | 43        |
| 5.2      | Qualitative und quantitative Befragung der Bewohnerschaft                              | 48        |
| 5.2.1    | Durchführung der qualitativen Befragung und Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse | 48        |
| 5.2.2    | Sozialpsychologische Modelle als Erklärung des Energieverbrauchsverhaltens             | 49        |
| 5.3      | Ergebnisse der quantitativen Befragung per Fragebogen                                  | 50        |
| 5.3.1    | Einflussfaktoren auf das Heizverhalten nach Alter und Geschlecht                       | 51        |
| 5.3.2    | Verbrauchsdatenanalyse                                                                 | 54        |
| 5.3.3    | Betrachtung des Fenster-Lüftungsverhaltens                                             | 61        |
| 5.4      | Empfehlungen zum Bewohnerverhalten: Maßnahmen zur Minimierung des Rebound-Effekts      | 63        |
| 5.4.1    | Übergreifende Maßnahmen                                                                | 64        |
| 5.4.2    | Maßnahmen vor der Sanierung                                                            | 64        |
| 5.4.3    | Maßnahmen nach der Sanierung                                                           | 64        |
| 5.5      | Zwischenfazit                                                                          | 65        |
| <b>6</b> | <b>Die Gebäude-Performance</b>                                                         | <b>67</b> |
| 6.1      | Berechnete Energiebedarfswerte                                                         | 67        |
| 6.2      | Reale Wetterdaten                                                                      | 70        |
| 6.3      | Gemessener Energieverbrauch der Gebäude                                                | 71        |
| 6.4      | Fehlfunktionen der Anlagentechnik                                                      | 75        |
| 6.4.1    | Trinkwarmwasserbereitung                                                               | 76        |
| 6.4.2    | Energieverteilung und -übergabe                                                        | 76        |
| 6.4.3    | Wärmepumpen                                                                            | 78        |
| 6.5      | Betrachtung des Nutzerverhaltens                                                       | 80        |
| 6.6      | Zwischenfazit                                                                          | 84        |
| <b>7</b> | <b>Fazit</b>                                                                           | <b>86</b> |
| <b>8</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>                                                            | <b>89</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1-1: Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern von 1971-2013, eigene Darstellung, Daten: IEA (2015) | 17 |
| Abb. 1-2: Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland, eigene Darstellung, Daten: BMWi 2015a                                     | 18 |
| Abb. 1-3: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Verwendungszweck 2012, eigene Darstellung, Daten: UBA 2015                  | 18 |
| Abb. 4-1: Gebäuderiegel vor der Sanierung                                                                                             | 30 |
| Abb. 4-2: Vereinfachter Lageplan (links) und Grundriss (rechts) der Gebäuderiegel                                                     | 31 |
| Abb. 4-3: Westfassade eines Gebäuderiegels nach der Sanierung                                                                         | 32 |
| Abb. 4-4: Frischwasserstation zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser                                                                  | 34 |
| Abb. 4-5: Schematische Darstellung des Monitoring-Systems                                                                             | 38 |
| Abb. 4-6: Details der Sensoren (Wärmemengenzähler, links) und der Daten-Logging-Station (rechts)                                      | 39 |
| Abb. 4-7: Raum-Mess-Einheit (RME)                                                                                                     | 40 |
| Abb. 4-8: Screenshot des HDF5-Viewers                                                                                                 | 42 |
| Abb. 5-1: Einflussfaktoren auf das menschliche Wohlbefinden                                                                           | 44 |
| Abb. 5-2: Schema des Heizenergie-Konsum-Modells                                                                                       | 46 |
| Abb. 5-3: Entwickeltes Technology Acceptance Model zur Unterscheidung von menschlichen und technischen Einflüssen                     | 50 |
| Abb. 5-4: Konstantes Heizen, Auswertung nach Alter                                                                                    | 52 |
| Abb. 5-5: Beheizte Räume, Auswertung nach Alter                                                                                       | 52 |
| Abb. 5-6: Bedienung der Heizung, Auswertung nach Geschlecht                                                                           | 53 |
| Abb. 5-7: Funktionsweise Heizsystem, Auswertung nach Geschlecht                                                                       | 53 |
| Abb. 5-8: Wunschgemäße Steuerung, Auswertung nach Geschlecht                                                                          | 54 |
| Abb. 5-9: Klassifizierung der Wohnungen                                                                                               | 55 |
| Abb. 5-10: Klassifizierung der befragten Wohnungen                                                                                    | 56 |
| Abb. 5-11: Hohe Temperaturen, Auswertung nach Verbrauchsgruppen                                                                       | 56 |
| Abb. 5-12: Heizsystem spart, Auswertung nach Verbrauchsgruppen                                                                        | 57 |
| Abb. 5-13: Heizsystem lästig, Auswertung nach Verbrauchsgruppen                                                                       | 58 |
| Abb. 5-14: Heizsystem vorher besser, Auswertung nach Verbrauchsgruppen                                                                | 59 |
| Abb. 5-15: Wirkung Lüftungsanlage, Auswertung nach Verbrauchsgruppen                                                                  | 59 |



|                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 5-16: Bedieneinheit einer Luftheizung                                                                                                                                                                                                | 60 |
| Abb. 5-17: Temperatur absenken, Auswertung nach Lüftungsanlage                                                                                                                                                                            | 61 |
| Abb. 5-18: Luftqualität ertragen, Auswertung nach Lüftungsanlage                                                                                                                                                                          | 61 |
| Abb. 5-19: Lüftungsverhalten der befragten Bewohner/innen                                                                                                                                                                                 | 63 |
| Abb. 6-1: Spezifischer Transmissionswärmeverlust vor (grau) und nach (Grünstufen) der Sanierung                                                                                                                                           | 68 |
| Abb. 6-2: Spezifischer Heizwärmebedarf pro Eingang und Riegel vor (grau) und nach (Grünstufen) der Sanierung                                                                                                                              | 68 |
| Abb. 6-3: Spezifischer Primärenergiebedarf je Eingang eines jeden Riegels vor (grau) und nach (Grünstufen) der Sanierung                                                                                                                  | 69 |
| Abb. 6-4: Berechneter Heizenergiebedarf unter Berücksichtigung des gemessenen Wetters (grün) und des Heizenergieverbrauchs (rot) für die drei Eingänge von Riegel 2 und Riegel 3 im Jahr 2011                                             | 72 |
| Abb. 6-5: Berechneter Heizenergiebedarf unter Berücksichtigung des gemessenen Wetters (grün) und des Heizenergieverbrauchs (rot) für die drei Eingänge von Riegel 2 und Riegel 3 in den Jahren 2012 (oben), 2013 (Mitte) und 2014 (unten) | 73 |
| Abb. 6-6: Primärenergiebedarf (grün) und -verbrauch (rot) in den Jahren 2012 und 2013 sowie Darstellung des Primärenergieeinsparindex                                                                                                     | 75 |
| Abb. 6-7: Heizenergieverbrauch (hellrot) und Energieverbrauch für Trinkwarmwasser (TWW, dunkelrot) für Riegel 2 Eingang 1 im Jahr 2012 (oben) und 2013 (unten)                                                                            | 77 |
| Abb. 6-8: Heizenergieverbrauch und Energieverbrauch für Trinkwarmwasser inkl. der jeweiligen Verluste für Riegel 3 im Jahr 2012                                                                                                           | 78 |
| Abb. 6-9: (Monatliche) Arbeitszahlen der Wärmepumpen in Riegel 3 im Jahr 2012 (oben) und im Jahr 2013 (unten)                                                                                                                             | 79 |
| Abb. 6-10: Verteilung des gemessenen Heizenergieverbrauchs (gemessen auf Wohnungsebene) während der Jahre 2012 bis 2014                                                                                                                   | 80 |
| Abb. 6-11: Chromatische Darstellung der Fassade von Riegel 2 während eines Wintermonats, Wärmeverchiebung zwischen den Wohnungen                                                                                                          | 81 |
| Abb. 6-12: Spezifische Wärmeverchiebung zwischen den Wohnungen eines Riegels in der Heizperiode 2013                                                                                                                                      | 83 |
| Abb. 6-13: Spezifische Wärmeleitungsverluste (bezogen auf die Nutzfläche nach EnEV) in kWh/m <sup>2</sup> pro Wohnung                                                                                                                     | 84 |

## Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 4-1: Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten des Riegels 1                                                                                                | 35 |
| Tabelle 4-2: Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten des Riegels 2                                                                                                | 36 |
| Tabelle 4-3: Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten des Riegels 3                                                                                                | 37 |
| Tabelle 5-1: Unterschiede im Heizwärmeverbrauch $q_h$ im November 2013 und der durchschnittlichen Temperatur, differenziert nach Alter                              | 52 |
| Tabelle 5-2: Klassifizierung der Wohnungen nach Verbrauch                                                                                                           | 55 |
| Tabelle 5-3: Lüftungsverhalten, Mittelwerte und Standardabweichung                                                                                                  | 62 |
| Tabelle 6-1: Monatsmittelwerte der Außentemperatur nach deutschem Standardwettersatz (Testreferenzjahr) und für Karlsruhe in den Jahren 2011 bis 2014               | 70 |
| Tabelle 6-2: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die Horizontalebene nach Standardwettersatz (Testreferenzjahr) und für Karlsruhe in den Jahren 2011 bis 2014 | 71 |

## Abkürzungen und Nomenklatur

### Formelzeichen und Einheiten

| Symbol                  | Bedeutung                                                  | Einheit                 |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| $A$                     | Fläche                                                     | $\text{m}^2$            |
| $A_N$                   | Gebäudenutzfläche                                          | $\text{m}^2$            |
| $c_{\text{wirk}}$       | wirksame spezifische Wärmekapazität eines Gebäudes         | -                       |
| $D$                     | geplanter Konsum                                           | -                       |
| $e_p$                   | Anlagenaufwandszahl (bezogen auf Primärenergie)            | -                       |
| $F_x$                   | Temperatur-Korrekturfaktor                                 | -                       |
| $f_p$                   | Primärenergiefaktor                                        | -                       |
| $G$                     | Globalstrahlung (auf die Horizontalebene)                  | $\text{kWh}/\text{m}^2$ |
| $G_t$                   | Gradtag                                                    | $\text{Kd}/\text{a}$    |
| $G_{t,\text{Potsdam}}$  | Gradtag der Referenzregion Potsdam                         | $\text{Kd}/\text{a}$    |
| $G_{t,\text{gemessen}}$ | Gradtag auf Grundlage von Messdaten                        | $\text{Kd}/\text{a}$    |
| $H_M$                   | spezifischer Wärmeverlust                                  | $\text{W}/\text{K}$     |
| $H_{T,j}$               | Transmissionswärmetransferkoeffizient zu angrenzender Zone | $\text{W}/\text{K}$     |
| $H_V$                   | spezifischer Lüftungswärmeverlust                          | $\text{W}/\text{K}$     |
| $H_{V,k}$               | Lüftungswärmetransferkoeffizient zu angrenzender Zone      | $\text{W}/\text{K}$     |
| $I_s$                   | solare Strahlungsintensität                                | $\text{W}/\text{m}^2$   |
| $n_{\text{ACH}}$        | Luftwechsel                                                | $\text{h}^{-1}$         |
| $n_{\text{mech}}$       | mechanische Luftwechselrate von Lüftungsanlagen            | $\text{h}^{-1}$         |
| $n_{\text{zul}}$        | zulässige Luftwechselrate von Lüftungsanlagen              | $\text{h}^{-1}$         |
| $n_{50}$                | Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz                   | $\text{h}^{-1}$         |
| $q_E$                   | auf Nutzfläche bezogener Endenergiebedarf                  | $\text{kWh}/\text{m}^2$ |
| $q_h$                   | auf Nutzfläche bezogener Heizwärmebedarf                   | $\text{kWh}/\text{m}^2$ |
| $q_p$                   | auf Nutzfläche bezogener Primärenergiebedarf               | $\text{kWh}/\text{m}^2$ |
| $q_w$                   | auf Nutzfläche bezogener Trinkwarmwasserwärmebedarf        | $\text{W}/\text{m}^2$   |
| $q_i$ bzw. $q_l$        | interne Wärmegewinne                                       | $\text{W}/\text{m}^2$   |
| $Q$                     | Jahresheizenergiebedarf                                    | $\text{W}$              |
| $Q_E$                   | Endenergiebedarf                                           | $\text{kWh}$            |

|                                   |                                               |           |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|-----------|
| $Q_g$                             | Wärmegewinne                                  | W         |
| $Q_{g,M}$                         | monatlicher Wärmegewinn                       | kWh       |
| $Q_h$                             | Heizwärmebedarf                               | W         |
| $Q_{h,Verbrauch}$                 | gemessener Heizwärmeverbrauch                 | W         |
| $Q_{h,Bedarf}$                    | errechneter Heizwärmebedarf                   | W         |
| $Q_i$                             | innere Wärmequellen und -senken               | W         |
| $Q_t$                             | Wärmeverlust                                  | W         |
| $Q_p$                             | Primärenergiebedarf                           | kWh       |
| $Q_{p, Bedarf nach Sanierung}$    | Primärenergiebedarf nach Sanierung            | kWh       |
| $Q_{p, Verbrauch nach Sanierung}$ | Primärenergieverbrauch nach Sanierung         | kWh       |
| $Q_{p, Verbrauch vor Sanierung}$  | Primärenergieverbrauch vor Sanierung          | kWh       |
| $Q_r$                             | Energiemengen regenerativer Energiesysteme    | W         |
| $Q_s$                             | Solare Fremdwärme- bzw. Kältemengen           | W         |
| $Q_{sink}$                        | Summe der Wärmesenken                         | W         |
| $Q_{source}$                      | Summe der Wärmequellen                        | W         |
| $Q_t$                             | Wärmeverluste der Anlagentechnik              | W         |
| $Q_T$                             | Transmissionswärmeströme                      | W         |
| $Q_{T,D}$                         | Transmissionswärmeströme nach außen           | W         |
| $Q_{T,u}$                         | Transmissionswärmeströme zu unbeheizten Zonen | W         |
| $Q_v$                             | Lüftungswärmeströme                           | W         |
| $Q_{TWW}$                         | Wärmebedarf für Trinkwarmwasser               | W         |
| $Q_{WRG}$                         | Wärmestrom der Wärmerückgewinnung             | W         |
| $R_s(S)$                          | Rebound-Effekt                                | -         |
| $S$                               | Nutzarbeit bzw. Energiedienstleistungen       |           |
| $S_{Erwartet}$                    | Primärenergiebedarf                           | kWh/(m²a) |
| $S_{Real}$                        | Primärenergieverbrauch                        | kWh/(m²a) |
| $U$                               | Wärmedurchgangskoeffizient                    | W/(m²K)   |
| $U_w$                             | Wärmedurchgangskoeffizient Fenster            | W/(m²K)   |
| $\Delta U_{WB}$                   | Wärmebrückenverlustkoeffizient                | W/(m²K)   |
| $V$                               | Mehrkonsum                                    | -         |
| $t_M$                             | Anzahl Tage pro Monat                         | Tage      |

|       |                                                 |                |
|-------|-------------------------------------------------|----------------|
| $t_m$ | Tagesmittel der Außentemperatur eines Heiztages | °C             |
| $V$   | beheiztes Luftvolumen                           | m <sup>3</sup> |
| $V_e$ | Gebäudevolumen                                  | m <sup>3</sup> |

### Griechische Formelzeichen

| Symbol         | Bedeutung                                                       | Einheit   |
|----------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| $\varepsilon$  | Energieeffizienz                                                |           |
| $\lambda$      | Wärmeleitfähigkeit                                              | W/(mK)    |
| $\eta_M$       | Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne                                | -         |
| $\eta_{HR}$    | Wärmerückgewinnungsgrad                                         | %         |
| $\Phi_i$       | interner Wärmegewinn                                            | kWh/Monat |
| $\Phi_s$       | mittlerer solarer Strahlungswärmegewinn                         | kWh       |
| $\Theta_e$     | Außentemperatur                                                 | °C        |
| $\Theta_{ed}$  | Heizgrenztemperatur                                             | °C        |
| $\Theta_i$     | Innenraumtemperatur                                             | °C        |
| $\Theta_j$     | durchschnittliche monatliche Temperatur einer angrenzenden Zone | °C        |
| $\Theta_u$     | mittlere Temperatur einer angrenzenden unbeheizten Zone         | °C        |
| $\Delta\Theta$ | Temperaturdifferenz                                             | K         |

### Indizes und Abkürzungen

| Symbol          | Bedeutung                                                   |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|
| BMWi            | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie                |
| CO <sub>2</sub> | Kohlenstoffdioxid                                           |
| dena            | Deutsche Energie-Agentur GmbH                               |
| E               | Eingang                                                     |
| E               | Energie                                                     |
| EBC             | Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate |
| EG              | Erdgeschoss                                                 |
| EFH             | Einfamilienhaus                                             |
| EnEV            | Energieeinsparverordnung                                    |

|      |                                                                |
|------|----------------------------------------------------------------|
| EPG  | Energy Performance Gap                                         |
| FCN  | Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior        |
| TOE  | tons of oil equivalent                                         |
| GUI  | graphical user interface                                       |
| HDF5 | hierachical data format                                        |
| HPM  | Heizenergie-Konsum-Modell                                      |
| JAZ  | Jahresarbeitszahl                                              |
| MAZ  | Monatsarbeitszahl                                              |
| IFEU | Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH      |
| IWU  | Institut Wohnen und Umwelt GmbH                                |
| MFH  | Mehrfamilienhaus                                               |
| NAPE | Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz                        |
| OG   | Obergeschoss                                                   |
| PG   | Performance Gap                                                |
| R    | Riegel                                                         |
| RME  | Raum-Mess-Einheit                                              |
| TAM  | Technology Acceptance Model                                    |
| TWW  | Trinkwarmwasser                                                |
| S    | Primärenergieeinsparindex                                      |
| UBA  | Umweltbundesamt                                                |
| VOC  | flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds) |
| W    | Wohneinheit                                                    |
| WLG  | Wärmeleitfähigkeitsgruppe                                      |
| WRG  | Wärmerückgewinnung                                             |



## Vorwort zur Schriftenreihe

Die Energieeffizienz im Gebäudesektor ist ein zentrales Thema der Energiepolitik der Bundesregierung. Seit vielen Jahren flankiert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen seiner Energieforschung Anstrengungen in diesem Bereich und fördert gezielt Maßnahmen zur Entwicklung und Erprobung neuer Technologien und Verfahren für energieoptimierte Gebäude und Quartiere. In diesem Zeitraum wurden viele Innovationen entwickelt, deren breite Umsetzung am Markt wichtige Beiträge zur Erreichung der energiepolitischen Ziele leisten kann. Um die Effizienz der Forschungsförderung zu erhöhen und den Ergebnistransfer in die Praxis zu beschleunigen, hat das BMWi das Forschungsnetzwerk Energie in Gebäuden und Quartieren gegründet. Im Mittelpunkt steht die strategische Vernetzung der Akteure: Vertreter aus Wirtschaft und Wissenschaft sowie wichtige Multiplikatoren wirken mit, um den Austausch an den Schnittstellen der Forschung zur Praxis und zur Politik zu intensivieren. Neben Technologieunternehmen sowie Energie- und Wohnungswirtschaft spielen auch Städte und Kommunen eine wichtige Rolle auf der Anwenderseite. Sie entscheiden über Versorgungsstrukturen, Bebauungspläne und energetische Standards in öffentlichen Gebäuden und können Investitionsentscheidungen und Verbraucherverhalten positiv beeinflussen. Der Einsatz neuer Technologien und moderner Planungsinstrumente kann diesen Gestaltungsspielraum deutlich erweitern.

Die Forschungsinitiativen „EnEff:Stadt“ und „EnEff:Wärme“ der Energieforschung des BMWi sind integraler Bestandteil des Forschungsnetzwerks Energie in Gebäuden und Quartieren. Sie bündeln langjährige praxisnahe Forschungsaktivitäten für mehr Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien im kommunalen Bereich und fördern die Vernetzung und integrale Zusammenführung der Bereiche „energetische Gebäudesanierung“ und „effiziente dezentrale Versorgungstechnologien“. Mit Blick auf die Ausweitung des Umsetzungspotenzials werden vor allem wirtschaftlich machbare Innovationen auf Quartiersebene in den Mittelpunkt gestellt. Beide Initiativen können inzwischen Erfolge in zahlreichen ambitionierten Projekten vorweisen. Die praktischen Erfahrungen zeigen aber auch Schwachstellen bzw. Felder auf, in denen noch Entwicklungsbedarf besteht. Es ist daher wichtig, diese Ergebnisse einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. Dies ist ein großes Anliegen der öffentlich geförderten Energieforschung und eine der zentralen Aufgaben des Forschungsnetzwerks.

Die wichtigsten Ergebnisse werden in unregelmäßigen Abständen innerhalb der Schriftenreihe veröffentlicht. Initiator und Herausgeber ist die Begleitforschung der Forschungsinitiative „EnEff:Stadt“, die sowohl Erfahrungsberichte ausgewählter Einzelprojekte als auch übergreifende Broschüren zu praxisrelevanten Themen publiziert. Praktiker aus Kommunen, Versorgungsunternehmen und Wohnungsunternehmen, aber auch Planer, Ingenieure, Hand-



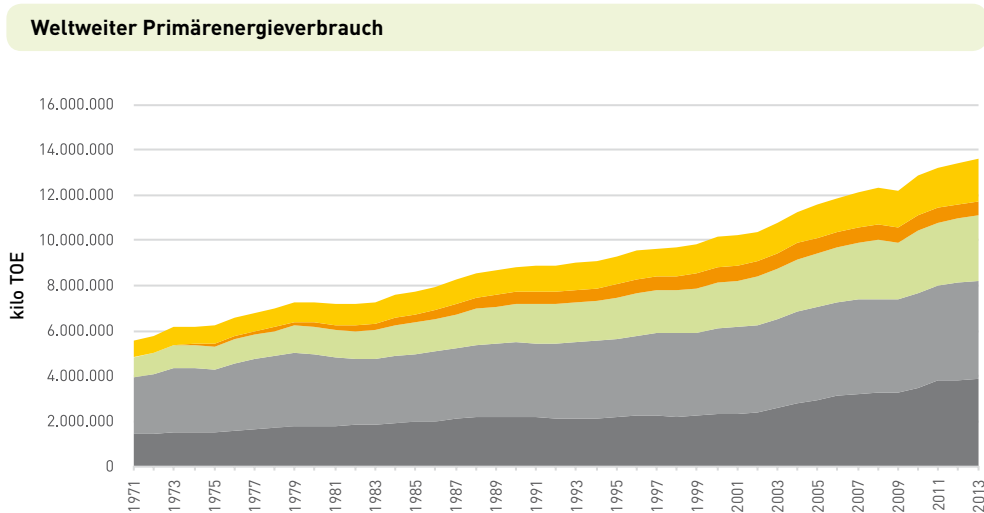
werker sowie Studierende der einschlägigen Fachrichtungen finden hier umfangreiche Hilfestellungen und Anregungen für ihre eigenen Vorhaben sowie besonders interessante Praxisbeispiele aus Einzelprojekten, die im Rahmen der Forschungsinitiativen EnEff:Stadt und EnEff:Wärme des BMWi entstanden sind.

Dr. Rodoula Tryfonidou  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

## 1 Energieeffizienz vor dem Hintergrund des weltweit ansteigenden Primärenergieverbrauchs

Autoren: Florian Heesen, Reinhard Madlener

Das weltweite Wirtschaftswachstum im Zuge von Industrialisierung und Globalisierung hat dazu geführt, dass auch der globale Primärenergieverbrauch seit Jahrzehnten steigt (siehe Abb. 1-1). Mit Blick auf das Bevölkerungswachstum lässt sich erwarten, dass er auch in den kommenden Jahren weiter steigen wird. Laut Internationaler Energieagentur soll sich dieser Anstieg bis zum Jahr 2040 auf ca. 40 % des Primärenergieverbrauchs im Vergleich zu 2010 belaufen.



**Abb. 1-1:** Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern von 1971–2013, eigene Darstellung, Daten: IEA (2015)

Eine steigende Weltbevölkerung muss nicht unbedingt einen steigenden Weltenergieverbrauch bedeuten, wenn die Energie effizient und rationell genutzt wird. Dazu müssen die Möglichkeiten eines klimaverträglichen technischen Fortschritts genutzt und Lerneffekte in der Energienutzung umgesetzt werden, um Ressourcen zu sparen. In Deutschland sollen moderne, energieeffiziente Technologien und erneuerbare Energiequellen eingesetzt werden, um im Zuge der Energiewende den Anstieg des Primärenergieverbrauchs zu begrenzen und den Endenergieverbrauch insgesamt bis zum Jahr 2050 nahezu konstant zu halten (BMW i 2011). Der Effizienzgedanke und die ressourceneffiziente Gestaltung des Energiesystems sind vor dem Hintergrund des anthropogenen Klimawandels in den Fokus von Politik, Gesellschaft und

Wirtschaft gerückt. So lautet eines der Energieeffizienzziele der Europäischen Union, im Zuge ihres Klima- und Energieprogramms 2030 mindestens 37 % des Energieverbrauchs im Gebäudesektor einzusparen (BMWi 2015b). Darüber hinaus nehmen führende Industrienationen bereits heute eine Vorbildfunktion ein und fördern eine Energiewende hin zu einem klimafreundlichen und ressourcenschonenden Energiesystem. Dabei ist die gesamtwirtschaftliche Energieeffizienz in Deutschland als Beitrag nicht nur zum Klimaschutz, sondern auch zur Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu verstehen (BMWi 2011).

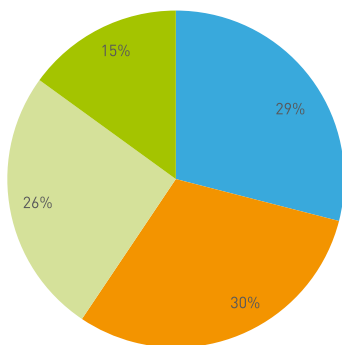
Die deutsche Bundesregierung formuliert im 5. Energieforschungsprogramm zwei Grundlinien in Bezug auf den Klimaschutz: Ausbau der erneuerbaren Energien und Steigerung der Energieeffizienz. Letztere soll durch eine Verdopplung der Energieproduktivität der deutschen Volkswirtschaft bis 2020 gegenüber 1990 erreicht werden; durchschnittlich muss dazu der spezifische Primärenergieverbrauch um 2,3 % pro Jahr verringert werden. Um dies zu erreichen, „müssen Maßnahmen zur Verbesserung der Energieproduktivität auf der gesamten Wertschöpfungskette des Energiesystems ansetzen, bei der Gewinnung, beim Transport, bei der Umwandlung (hier insbesondere bei der Stromerzeugung und bei der Wärmeerzeugung) sowie bei der Energienutzung durch die Industrie, im Gewerbe, im Handel, bei Dienstleistungen, im Verkehr und bei den privaten Haushalten“. (BMWA 2005)

**Abb. 1-2 (links):** Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland, eigene Darstellung, Daten: BMWi (2015a)

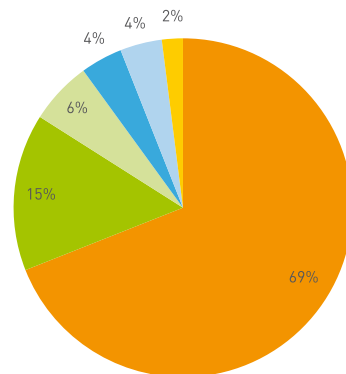
- private Haushalte
- Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
- Industrie
- Verkehr

Ein Blick auf die aktuelle Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland (Abb. 1-2) zeigt für 2013 einen Anteil der privaten Haushalte am Endenergieverbrauch von 26 %.

**Endenergieverbrauch in Deutschland 2013**



**Endenergieverbrauch privater Haushalte nach Verwendungszweck 2012**



**Abb. 1-3 (rechts):** Endenergieverbrauch der privaten Haushalte nach Verwendungszweck 2012, eigene Darstellung, Daten: UBA (2015)

- Heizen
- Warmwasser
- Kochen
- Kühl- und Kälteanwendungen
- Informations- und Kommunikationstechnologie
- Beleuchtung

Der Endenergieverbrauch privater Haushalte setzt sich im Wesentlichen aus den Komponenten Raumwärme/Heizen (ca. 69 %) und Warmwasser (ca. 15 %) zusammen (Abb. 1-3). Energieeffizienzmaßnahmen in diesen Bereichen bergen somit erhebliches Potenzial, um den Endenergieverbrauch zu beeinflussen. Bis zum heutigen Zeitpunkt ist in diesem Zusammenhang der Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch unzureichend erforscht und hat sich durch den steigenden technologischen Standard und die dadurch neu eröffneten Möglichkeiten weiter erhöht (Virote und Neves-Silva 2012). In der vorliegenden Publikation soll daher speziell der menschliche Einfluss auf den Heiz- und Warmwasserenergieverbrauch betrachtet werden.

Das aktuelle 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung bestätigt den bereits beschrittenen energiepolitischen Weg, indem es den Fokus auf die „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ legt (BMWi 2011). Das Programm setzt auf vielen Feldern neue Akzente. Von Bedeutung sind dabei vor allem „die klare Priorität bei der Förderung von Forschung und Entwicklung in den Bereichen ‚Energieeffizienz‘ und ‚Erneuerbare Energien‘, eine verstärkte ressortübergreifende Zusammenarbeit auf strategisch wichtigen Feldern, insbesondere bei den Themen ‚Energiespeicher‘ und ‚Netze‘, der Ausbau der internationalen Forschungszusammenarbeit sowie eine verbesserte Koordinierung und Abstimmung der Förderpolitik“. Die deutsche Bundesregierung beabsichtigt, die Energiewende mit einer Vielzahl von Projekten und Fördermitteln voranzutreiben. Sowohl den Energieverbrauch zu senken (bzw. zu stabilisieren) als auch Energieproduktion aus regenerativen Energien auszubauen ist bei allen Maßnahmen als Ziel gesteckt.

Die Förderung von Effizienzmaßnahmen wird in Deutschland breit diskutiert. Die Süddeutsche Zeitung titelt zum Thema Energieeffizienz im Gebäudesektor vom „großen Verbrauch des kleinen Mannes“, womit der Energieverbrauch der privaten Haushalte und die Energieeinsparpotenziale in diesem Bereich gemeint sind (Süddeutsche Zeitung 2013). Die Tageszeitung Die Welt titelt im Jahr 2014, dass die Deutschen mehr Energie als jemals zuvor verbrauchen, und führt dies unter anderem auf den Anstieg der Ein-Personen-Haushalte, den Rückgang des Ölpreises und die gestiegene Anzahl elektrischer Geräte je Haushalt sowie deren längere Benutzung zurück (Die Welt 2014). Verstärkte Bemühungen, den Energieverbrauch durch Effizienzsteigerungen zu senken, sind gesamthaft betrachtet bisher also noch nicht erfolgreich. Im Gegenteil: Im Zeitungsartikel „Das unterschätzte Paradoxon der Klimapolitik“ hat Die Zeit bereits 2012 vom Phänomen berichtet, dass bspw. energieeffizientere Geräte häufiger als zuvor genutzt werden, da ihre Nutzung durch die Energieeinsparung nun günstiger geworden ist (Die ZEIT 2012).

Dieses Phänomen wird als „Rebound-Effekt“ bezeichnet und wurde bereits vor 150 Jahren vom britischen Ökonomen William Stanley Jevons beschrieben. Seit einigen Jahren ist der Rebound-Effekt Gegenstand energieökonomischer Studien (z. B. Madlener und Alcott 2009) und indirekt der Forschungsförderung. Bereits seit dem 5. Energieforschungsprogramm beziehen sich deren Schwerpunkte zum Beispiel auf energieoptimiertes Bauen, wirtschafts- und sozialwissenschaftliche inter- und transdisziplinäre Untersuchungen sowie die Erforschung

rationeller Energieanwendung. In diesem Rahmen werden energieeffiziente Wohngebäude untersucht, Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz von erneuerbaren Energien aufgeworfen sowie gesellschaftliche Folgen der verstärkten Nutzung regenerativer Energien erforscht (BMWA 2005).

Die Forschungsvorhaben „Auswirkungen des Reboundeffekts bei der Sanierung von Bestandsgebäuden“ (BMWi-Förderkennziffer 03ET1105A) sowie „Analyse des Energieverbrauchsverhaltens der Bewohner von energieeffizienten Wohngebäuden“ (BMWi-Förderkennziffer 03ET4004) fügen sich in die genannten Schwerpunkte des 6. Energieforschungsprogramms ein und untersuchen gemeinsam das Energieverbrauchsverhalten der Bewohner/innen eines Karlsruher Wohnquartiers. Ziel dieser Projekte ist es, diejenigen Faktoren zu identifizieren und zu untersuchen, die das Energieverbrauchsverhalten der Bewohnerschaft bestimmen. In diesem Rahmen werden Wirkungszusammenhänge zwischen verbauter Technik und Mensch beobachtet und ausgewertet. In der vorliegenden Publikation sollen die Verhaltensweisen der Bewohner/innen energieeffizient sanierter Wohngebäude beschrieben und analysiert werden. Details der zugrunde liegenden Projekte, die über den Rahmen dieser Schrift hinausgehen, können auf den jeweiligen Webseiten der Institute ([www.eonerc.rwth-aachen.de/ebc](http://www.eonerc.rwth-aachen.de/ebc), [www.eonerc.rwth-aachen.de/fcn](http://www.eonerc.rwth-aachen.de/fcn)) nachgelesen sowie den Projektbeschreibungen auf der Website der Initiative EnEff:Stadt ([www.eneff-stadt.info](http://www.eneff-stadt.info)) entnommen werden.

Als Erstes soll im Folgenden der Rebound-Effekt als Grundlage der darauf folgenden Analysen eingeführt und definiert werden. Anschließend werden die Forschungsvorhaben ausführlich beschrieben und die Sanierungsvarianten sowie die Datenbasis aus dem Monitoring erläutert. Ergänzend werden die laut Norm zulässigen Bedarfsberechnungen hergeleitet und die verwendeten Energiekennzahlen vorgestellt. Anhand der Energiekennzahlen werden der reale Energieverbrauch der Gebäude und der Einfluss der Nutzenden ermittelt. Im Anschluss an die technische Auswertung des Nutzerverhaltens wird darauf aufbauend das Nutzerverhalten aus der Sicht der Bewohner/innen analysiert. Die so erfasste Wahrnehmung der Technik und des Nutzerverhaltens wird schließlich mit den Messdaten des Monitoring abgeglichen und bewertet.

## 2 Herleitung der Begriffsdefinitionen

Autoren: Florian Heesen, Reinhard Madlener

Der Rebound-Effekt wird häufig als ökonomischer Effekt aufgefasst und kann beispielsweise bei durchgeführten Energieeffizienzmaßnahmen auftreten (Sorrell et al. 2009). Durch Effizienzmaßnahmen sollen kongruent zu den Energieeinsparungen auch Kosteneinsparungen erzielt werden. Allerdings tritt vielfach ein gegenläufiger Effekt ein: Die Energieeinsparungen fallen geringer aus als erwartet, da durch die Kosteneinsparungen die Nachfrage nach ebendiesen Energiedienstleistungen steigt, es erfolgt also eine Art von Rückschlag bzw. Rücksprung. Die ersten Beschreibungen dieses Effekts gehen auf das „Jevons-Paradoxon“ zurück. William Stanley Jevons erkannte vor 150 Jahren Folgendes: Steigert man die Effizienz, mit der eine Nutzarbeit unter Einsatz von Kohle verrichtet werden kann, so wird die Menge der verbrauchten Kohle steigen (Jevons 1865). Saunders (1992) betitelte das Phänomen zunächst als „Khazoom-Brooks-Postulat“, denn Len Brooks und Daniel Khazoom waren Ende der 1970er, Anfang der 1980er Jahre die ersten, die Jevons Beobachtung aufgriffen und weitergehend analysierten. Seit der Jahrtausendwende werden Abweichungen in erwarteten Energieeinsparungen nach Effizienzsteigerungen mit dem Begriff „Rebound-Effekt“ beschrieben. Dabei hat sich im Laufe der Jahre die formale Definition nach Sorrell & Dimitropoulos (2008) unter Ökonomen durchgesetzt, die das Verhältnis zwischen der anteiligen Änderung in der Nachfrage nach Energiedienstleistungen und der entsprechenden Änderung in der Energieeffizienz beschreibt.

In der Literatur existieren dennoch unterschiedliche Definitionen für dieses Phänomen (vgl. Turner 2013). Ein direkter Vergleich der Studien ist daher nicht möglich. Unterschiedliche Datenquellen in Studien zu Energieeinsparungen durch Effizienzmaßnahmen und verschiedene Methoden zur Berechnung oder Schätzung des Rebound-Effekts bedingen, dass letztendlich verschiedene Ergebnisse bezüglich des Effekts beschrieben werden (wie u. a. in Jenkins et al. 2011, Greening et al. 2000, Sorrell et al. 2009). Wie schon Madlener und Alcott (2008) gezeigt haben, existierten bereits 2008 mindestens 28 unterschiedliche Definitionen für das Phänomen Rebound. Im Folgenden werden die Formaldarstellung des direkten Rebound-Effekts nach Sorrell & Dimitropoulos (2008) sowie die Definition des Energy Performance Gap (EPG) nach Haas et al. (1998) als Arbeitsgrundlage für die Auswertungen dieser Publikation präsentiert.

## 2.1. Rebound-Effekt und Performance Gap

Der direkte Rebound-Effekt ist als die anteilige Änderung in der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (z. B. Raumheizung, Raumkühlung, Beleuchtung) im Verhältnis zur entsprechenden anteiligen Änderung in der Energieeffizienz definiert. Der originäre Grund für das Auftreten des Rebound-Effekts ergibt sich aber aus einer Abwägung des Verbrauchers zwischen zusätzlichen Kosten und zusätzlichem Nutzen.

$$R_s(S) = \frac{\partial S}{S} / \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{S} \quad (2.1)$$

$R_s(S)$  = Rebound-Effekt

$S$  = Nutzarbeit bzw. Energiedienstleistungen

$\varepsilon$  = Energieeffizienz

Der Performance Gap (PG) ist ein Mehrkonsum, der als Anteil am geplanten Konsum definiert ist. Diese Größe definiert eine Verhaltensänderung rein aus der Abweichung des geplanten vom realisierten Verhalten und basiert dementsprechend nicht auf historischen Daten. Der Performance Gap, Formel 2.2, berechnet die Abweichung zwischen geplantem und realisiertem Konsum.

$$PG(E) = \frac{V}{D} \quad (2.2)$$

$PG(E)$  = Performance Gap (Energieleistungslücke)

$V$  = Mehrkonsum

$D$  = geplanter Konsum

Jaffe und Stavins (1994) definieren das Phänomen Performance Gap zunächst theoretisch. Vergleichbar mit dem hier vorliegenden Feldversuch beschreiben Haas et al. (1998) als Erste das Phänomen Performance Gap im Gebäudebereich: Die beobachteten Energieverbräuche weichen von den berechneten Energiekennzahlen ab. Die Autoren quantifizieren den von ihnen definierten „Rebound Share“ für ca. 400 Wohngebäude in Österreich mit 15 % bis 30 %. Erhorn (2007) zeigt Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch bei Ein- und Mehrfamilienhäusern in Deutschland von bis zu 300 %. Hens (2010) beschreibt die Ergebnisse der schrittweise erfolgten Sanierung eines belgischen Reihenhauses und zeigt ebenfalls Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Verbrauchswerten über einen langen Zeitraum. Hens et al. (2010) bestätigen diese Abweichungen in einer großen Stichprobe von 964 belgischen Wohngebäuden. Die vorliegende Publikation knüpft an die genannte Literatur an und überprüft interdisziplinär die identifizierten technischen und menschlichen Faktoren, welche die Abweichungen verursachen.

## 2.2 Wirkungsebene des Rebound-Effekts

In der Literatur zum Rebound-Effekt werden verschiedene Wirkungsebenen beschrieben, anhand derer er untersucht werden kann. Je nach Untersuchungsobjekt und Betrachtungsebene kann der Rebound-Effekt einer Wirkungsebene zugeordnet werden. Der Verbraucher reagiert dabei nicht nur unmittelbar auf die Veränderung der Anlage bzw. deren Effizienz, sondern auch mittelbar. Ebenfalls sollten mögliche weiterreichende Wirkungen beachtet werden, beispielsweise auf andere Bereiche der gesamten Wirtschaft. Folgende Wirkungsebenen werden unterschieden:

- direkter Rebound-Effekt,
- indirekter Rebound-Effekt und
- makroökonomischer Effekt.

Die drei Wirkungsebenen sollen im Folgenden einzeln kurz beschrieben werden. Die Wirkungsebenen werden im vorliegenden Feldversuch keiner weiteren Analyse unterzogen, müssen an dieser Stelle aber erwähnt werden, da der Klimawandel als globale Herausforderung eine Betrachtung aller Effekte erfordert, die sich aus den Energieeinsparbemühungen ergeben. Nur so lässt sich letztlich eine Bewertung der Effektivität der Maßnahmen durchführen. Der Feldversuch muss daher im Nachhinein aus einer übergeordneten Perspektive bzw. als Teil einer gesamtwirtschaftlichen Analyse bewertet werden.

### 2.2.1 Direkter Rebound-Effekt

Der direkte Rebound-Effekt bezieht sich nur auf die Energiedienstleistung, deren Energieeffizienz verändert wurde. Wenn es sich bei der betrachteten Energiedienstleistung zum Beispiel um die Beleuchtung eines Raumes handelt, die wegen einer Energieeffizienz-Steigerung nun kostengünstiger ist als zuvor und deshalb mehr genutzt wird, beschreibt dies den direkten Rebound-Effekt (Sorrell 2007). Dieser umfasst also, formal gesehen, stets die Erhöhung des Nutzungsgrads einer Anlage (Brännlund et al. 2007). Es handelt sich dabei ausschließlich um einen Preiseffekt. Dieser kann in die Kategorien Einkommens- und Substitutionseffekt untergliedert werden. Allerdings sollte beachtet werden, dass die Konsumenten nicht unendlich (Energie-)Dienstleistungen konsumieren können, da irgendwann der Konsum gesättigt ist (vgl. Kapitel 5.1).

### 2.2.2 Indirekter Rebound-Effekt

Der indirekte Rebound-Effekt bezieht sich auf die Auswirkungen auf den Konsum anderer Güter bzw. Energiedienstleistungen und tritt ein, wenn infolge einer energieeffizienteren Energiedienstleistung andere Energiedienstleistungen oder Güter stärker nachgefragt werden. Übertragen auf das oben genannte Beispiel Beleuchtung heißt das, dass aufgrund der



erhöhten Energieeffizienz der Beleuchtung diese nun kostengünstiger geworden ist und infolgedessen andere Energiedienstleistungen wie z. B. Raumwärme stärker nachgefragt werden können. Andere Energiedienstleistungen werden also mehr genutzt (Thomas und Azevedo 2013). Es handelt sich formal um einen Einkommenseffekt durch die Einsparung, denn durch die Effizienzsteigerung verfügen die Verbraucher über mehr Vermögen und können andere Güter stärker nachfragen. Das Ausmaß dieses Effekts hängt vom Anteil des Einkommens ab, der für die Energiedienstleistungen verwendet wird, bzw. den gesamten Ausgaben für die Energiedienstleistungen. Der indirekte Rebound-Effekt kann auch bei Unternehmen auftreten. Diese können infolge einer energieeffizienteren Produktion günstiger produzieren. Eine technologisch begründete Kostensenkung kann zum Beispiel für Energiedienstleistungen Auswirkungen auf die Nachfrage eines Unternehmens nach Brennstoff bzw. Kraftstoff haben. Allerdings benötigen energieeffiziente Anlagen selbst Energie zur Herstellung, die beim berechneten Einsparpotenzial oft nicht berücksichtigt wird (Jenkins et al. 2011). Insgesamt macht sich der indirekte Rebound-Effekt in einer verstärkten Nachfrage nach anderen Gütern und Dienstleistungen bemerkbar (Chitnis et al. 2013).

### 2.2.3 Makroökonomischer Effekt

Energieeffizienzsteigerungen auf der mikroökonomischen Ebene haben zusammen genommen Einfluss auf makroökonomische Mechanismen. Dies können Marktpreiseffekte, Kompositionseffekte sowie Wirtschaftswachstumseffekte sein (Jenkins et al. 2011). Generell handelt es sich um Gleichgewichtseffekte. Die oben geschilderte Veränderung der Nachfrage führt zu einer Anpassung des Preisniveaus (Marktpreiseffekt, vgl. Brännlund et al. 2007). Eine Steigerung der Energieeffizienz begünstigt Produkte mit energieintensiver Herstellung. Die Steigerung kann dazu führen, dass der Anteil dieser Produkte in der Zusammensetzung der gesamtwirtschaftlichen Nachfrage steigt (Kompositionseffekt). Die Steigerung der Energieeffizienz führt zu Wirtschaftswachstum und somit dazu, dass auch die Produktion und der Energieverbrauch steigen (Jenkins et al. 2011). Man nennt dies den Wirtschaftswachstumseffekt. Die beschriebenen Veränderungen sind Folgen direkter oder indirekter Einflüsse (Greening et al. 2000).

### 2.2.4 Einzeleffekte

Alle Einzeleffekte zusammen ergeben den gesamten volkswirtschaftlichen Rebound-Effekt (Jenkins et al. 2011). Viele Studien konzentrieren sich bei der Untersuchung des Rebound-Effekts auf die Nachfrage nach einem bestimmten Energieträger. Die Höhe der verbrauchten Energie hat jedoch nur begrenzte Aussagekraft bezüglich der tatsächlich wahrgenommenen Verhältnisse im Wohnraum. Denn schon Schipper stellt fest: „In all cases it is resource use and consumer amenity satisfaction that is being optimized, not simply energy use per unit of output.“ (Schipper 1979)

Das eigentliche Interesse der Bewohner/innen besteht darin, ein für sie angenehmes Raumklima zu schaffen. Der Rebound-Effekt wird in diesem Zusammenhang als Ausgangspunkt für weitere Analysen anhand der Nachfrage nach Energiedienstleistungen der Bewohner/innen untersucht. Weitergehende Analysen des Energieverbrauchsverhaltens können dann jeweils auf diesen Referenzpunkt zurückgeführt werden. Interdisziplinäre Forschung ist notwendig, um die Erkenntnisse aus den Disziplinen der Ingenieurwissenschaften, der Wirtschaftswissenschaften, der Psychologie und der Soziologie bzw. Anthropologie zusammenzuführen.

### 3 Bewertungsmethoden

Autoren: Davide Calì, Tanja Osterhage, Rita Streblow, Dirk Müller

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) ist die Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden sowie für die Erstellung von Energieausweisen. Die Verordnung gibt die Normen vor, nach denen Planer und Energieberater den Heiz-, End- und Primärenergiebedarf berechnen müssen. Darüber hinaus sind durch die EnEV die maximalen spezifischen Transmissionswärmeverluste und Primärenergiebedarfswerte für jede Gebäudeart und -größe festgesetzt.

Das hier vorgestellte Berechnungsverfahren setzt sich aus dem Monatsbilanzverfahren nach DIN V 4108-6 und der Berechnung der Anlagenaufwandszahlen nach DIN V 4701-10 zusammen. Die so gewonnenen Ergebnisse ermöglichen einen Vergleich zwischen dem berechneten Bedarf und dem gemessenen Verbrauch. Mithilfe von Energy Performance Gap (EPG) und Primärenergieeinsparindex lassen sich somit die Gebäude energetisch bewerten und unterschiedliche Sanierungsvarianten vergleichen.

#### 3.1 Bedarfsberechnungen nach Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die DIN V 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“ beschreibt die Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden. Die EnEV, die gesetzliche Grundlage in Deutschland, nimmt Bezug auf diese Norm. Die DIN V 4108-6 gibt die Berechnungsschritte für den Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarf vor und enthält alle wesentlichen Rechenvorschriften, um den Jahresheizwärmebedarf für Wohngebäude nach EnEV zu ermitteln. Der Jahresheizwärmebedarf  $Q_h$  entspricht der rechnerischen Energiemenge, die dem Gebäude zugeführt werden muss, um eine Innentemperatur von 19 °C aufrecht zu erhalten. Um diese zu ermitteln, ist seit der EnEV 2014 nur noch das Monatsbilanzverfahren zulässig. Der Jahresheizwärmebedarf ergibt sich dabei aus der Summe der Monatsheizwärmeverbräuche (siehe Gleichung 3.1):

$$Q_h = \sum Q_{h,M} \mid \text{Positiv} \quad \frac{\text{kWh}}{a} \quad (3.1)$$

Der monatliche Heizwärmebedarf ergibt sich nach Gleichung 3.2 und setzt sich aus den monatlichen Verlusten  $Q_{l,M}$  unter Berücksichtigung des Ausnutzungsgrades  $\eta$  der monatlichen Gewinne  $Q_{g,M}$  zusammen. Die Heizwärmeverluste ergeben sich durch die Transmissions- und Lüftungsverluste. Die Gewinne werden durch solare sowie interne Lasten erzeugt. Da nicht alle Gewinne nutzbar gemacht werden können, wird der Ausnutzungsgrad berücksichtigt:

$$Q_{h,M} = Q_{L,M} - \eta_M Q_{g,M} \quad \frac{\text{kWh}}{\text{M}} \quad (3.2)$$

Um Gebäude zu vergleichen, wird häufig auf die spezifischen, auf die Nutzfläche bezogenen Bedarfswerte zurückgegriffen. Die Nutzfläche nach EnEV ergibt sich nach Gleichung 3.3. Hierfür wird das beheizte Bruttogebäudevolumen  $V_e$  mit dem Faktor 0,32 multipliziert.

$$A_N = V_e \cdot 0,32 \quad \text{m}_N^2 \quad (3.3)$$

Der spezifische Heizenergiebedarf ist in Gleichung 3.4 angegeben.

$$q_h = \frac{Q_h}{A_N} \quad \frac{\text{kWh}}{\text{am}_N^2} \quad (3.4)$$

Die monatlichen Heizwärmeverluste ergeben sich nach Gleichung 3.5. Sie setzen sich aus der Multiplikation der monatlichen Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung (siehe Gleichung 3.6) sowie der Temperaturdifferenz zwischen Innenluft- (19 °C) und mittlerer monatlicher Außenlufttemperatur unter Berücksichtigung der Anzahl der Tage des betrachteten Monats sowie einem Umrechnungsfaktor zusammen. Durch den Faktor von 0,024 werden Tage in Stunden und Watt in Kilowatt umgerechnet.

$$Q_{L,M} = 0,024 \cdot H \cdot (\theta_i - \theta_a) \cdot t_M \quad \frac{\text{kWh}}{\text{M}} \quad (3.5)$$

$$H = H_T + H_V \quad \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (3.6)$$

Der spezifische Heizwärmeverlust setzt sich aus den Transmissionswärmeverlusten (Bauteile in Kontakt mit Außenluft und innenliegende Bauteile angrenzend an unbeheizte oder gering temperierte Räume) und Lüftungswärmeverlusten zusammen.

Um den End- und Primärenergiebedarf zu ermitteln, wird das Rechenverfahren nach DIN V 4701-10 angewendet. Der Primärenergiebedarf ergibt sich aus der Summe des Heizwärme-  $Q_h$  und Trinkwarmwasserwärmebedarfs  $Q_{TWW}$  multipliziert mit der Anlagenaufwandszahl  $e_p$ . Der Wärmebedarf für Trinkwarmwasser ergibt sich aus der Multiplikation der Nutzfläche nach EnEV und einem normativ vorgegebenen Faktor von 12,5 kWh/m². Die Anlagenaufwandszahl  $e_p$  ist ein Kennwert für die gesamtenergetische Effizienz der betreffenden Heizungs-, Trinkwarmwasser- und Lüftungsanlagen. Die Anlagenaufwandszahl beinhaltet

zugleich einen Konvertierungsfaktor, um den Primärenergie- aus dem Nutzenergiebedarf zu berechnen. Durch diesen Faktor wird die gesamte Energiekette von der Erzeugung bis zur Nutzung im Gebäude berücksichtigt: die Extraktion des Primärenergieträgers und seine Verteilung, die Umwandlung der Primärenergie in Wärme, die Übertragung und Speicherung der Wärme und schließlich ihre Verteilung innerhalb des Gebäudes.

Die DIN V 4701-10 enthält drei Verfahren für die Berechnung der Anlagenaufwandszahl: das Tabellenverfahren, ein grafisches Verfahren und das detaillierte Verfahren, welches die Eingabe von gerätspezifischen Werten erlaubt. Das detaillierte Verfahren ist für die hier vorliegenden Berechnungen der Anlagenaufwandszahl benutzt worden.

$$Q_P = e_P \cdot (Q_h + Q_{TWW}) \quad \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \quad (3.7)$$

Für weitergehende Details zu den Berechnungsmethoden sei auf die entsprechenden DIN-Normen und auf die EnEV verwiesen. Die erläuterten Parameter und Kennzahlen werden im Folgenden genutzt, um die umgesetzten Sanierungsvarianten zu bewerten.

### 3.2 Energy Performance Gap und Primärenergieeinsparindex

Die berechneten Energieeinsparungen können deutlich von den gemessenen Energieverbräuchen abweichen (Hens 2010; Menezes et al. 2012; Calì et al. 2013). Dieses Phänomen wird in der Literatur als „Energy Performance Gap“ (Energieperformancelücke) bezeichnet (Hirst und Brown 1990; Galvin 2013). Es gilt zu beachten, dass Gebäude mit komplexer, anspruchsvoller Anlagentechnik dazu tendieren, einen erhöhten Energieverbrauch aufzuweisen, da der Einfluss des Nutzers hier deutlich zu Buche schlägt (Virote 2012).

Das hier definierte Energy Performance Gap gibt die prozentuale Differenz zwischen berechnetem und gemessenem Energieverbrauch an (siehe Gleichung 3.8).

$$\text{EPG} = \frac{Q_{h, \text{Verbrauch}} - Q_{h, \text{Bedarf}}}{Q_{h, \text{Bedarf}}} \cdot 100 \quad \% \quad (3.8)$$

Das hier bilanzierte Energy Performance Gap bezieht sich auf den Bereich Heizwärme und beinhaltet somit Informationen zum Nutzerverhalten und dessen Heizungs- sowie Lüftungsverhalten (an der Wohnungsgrenze). Mit dessen Hilfe können das Nutzerverhalten und die Funktionsweise einer Lüftungsanlage mit und ohne Wärmerückgewinnung bewertet werden. Auf Basis der vorliegenden Messdaten ist es nicht möglich, die Auswirkungen der zwei Parameter getrennt voneinander zu betrachten.

Um die Gesamteffektivität einer Sanierungsmaßnahme überprüfen und bewerten zu können, kann der erwartete Primärenergiebedarf (Gleichung 3.9) mit dem gemessenen Primärenergieverbrauch (Gleichung 3.10) ins Verhältnis gesetzt werden.

$$S_{\text{Erwartet}} = \left( 1 - \frac{Q_{\text{P, Bedarf nach Sanierung}}}{Q_{\text{P, Verbrauch vor Sanierung}}} \right) \cdot 100 \quad \% \quad [3.9]$$

$$S_{\text{Real}} = \left( 1 - \frac{Q_{\text{P, Verbrauch nach Sanierung}}}{Q_{\text{P, Verbrauch vor Sanierung}}} \right) \cdot 100 \quad \% \quad [3.10]$$

## 4 Beschreibung des Feldversuchs

Autoren: Davide Calì, Tanja Osterhage, Rita Streblow, Dirk Müller

Die Wohnungsnot in Deutschland nach dem zweiten Weltkrieg führte zu einem schnellen Wiederaufbau der Gebäude und zum Bau zahlreicher Neubauten. Laut Statistischem Bundesamt (2012) sind 11 Millionen Wohneinheiten bereits vor 1945 und weitere 17,6 Millionen zwischen 1945 und 1976 gebaut worden. Für die heutige Wohnsituation bedeutet dies, dass über 28 Millionen Wohneinheiten, das sind 74 % aller Wohneinheiten (BMWi 2011), vor der ersten Wärmeschutzverordnung im Jahre 1977 gebaut wurden. Ein Großteil dieser Wohnungen befindet sich im unsanierten oder teilsanierten Zustand.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Quartierskonzept energieeffizientes Rintheim – wissenschaftliche Begleitung“ sind drei Mehrfamilienhäuser aus den 1950er-Jahren (siehe Abb. 4-1) saniert worden. Die energetische Modernisierung hat in den Jahren 2008 bis 2010 stattgefunden und wurde mit den zum damaligen Zeitpunkt aktuellsten Technologien durchgeführt. Im Zuge der Sanierung wurden unterschiedliche Sanierungsvarianten mit dem Ziel umgesetzt, unter realen Bedingungen das energetische Einsparpotenzial zu quantifizieren. Im Rahmen der Folgeprojekte „Auswirkungen des Reboundeffekts bei der Sanierung von Bestandsgebäuden“ sowie „Analyse des Energieverbrauchsverhaltens der Bewohner von energieeffizienten Wohngebäuden“ werden die im Zuge des Feldversuchs gewonnenen Daten genutzt, um den Nutzereinfluss auf den Energieverbrauch zu bestimmen, zu analysieren und zu quantifizieren. Detaillierte Informationen über die Gebäude, deren Sanierungsvarianten sowie die Auswertung der Messdaten sind in Müller et al. (2012) zu finden.

**Abb. 4-1:** Gebäuderiegel vor der Sanierung, Quelle: VOLKSWOHNUNG Karlsruhe



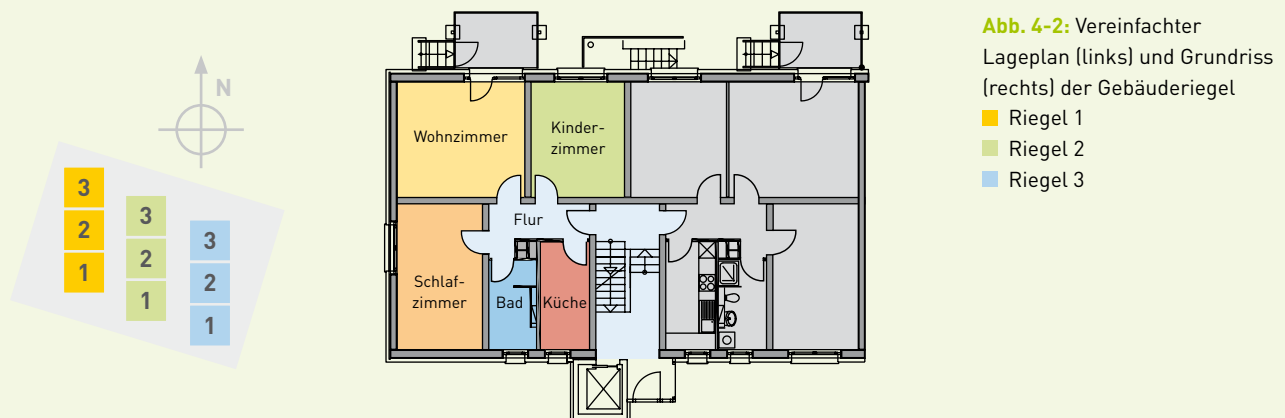
## 4.1 Gebäudebeschreibung

Die drei gleich ausgerichteten Gebäuderiegel des Feldversuchs (siehe Abb. 4-2) waren, wie die meisten Gebäude dieser Baualtersklasse, vor Sanierungsbeginn mit einem schlechten Wärmeschutz und mangelhafter Anlagentechnik ausgestattet.

Die Gebäuderiegel stehen parallel nebeneinander und verfügen jeweils über drei Eingänge (siehe Abb. 4-2 links). Je Eingang werden jeweils 10 identische Dreizimmerwohnungen erschlossen. Sie bestehen aus Schlaf-, Kinder- und Wohnzimmer zzgl. Küche und Bad. Die Eingangsfassade ist nach Osten orientiert, jeder Gebäuderiegel ist 52 m lang und 10 m breit. Schon vor den im Projekt durchgeführten Sanierungsmaßnahmen wurde die südliche Giebfassade mit einer 4 cm dicken Schicht gedämmt, außerdem wurden in den 1980er-Jahren die Fenster ausgetauscht. Im Rahmen der vorliegenden Veröffentlichung werden zur Übersichtlichkeit die Gebäuderiegel im Folgenden mit „R“, die einzelnen Eingänge mit „E“ und die Wohnungen mit „W“ bezeichnet.

## 4.2 Die Sanierungsvarianten

Die durchgeführten Sanierungsvarianten wurden in enger Zusammenarbeit mit dem kommunalen Wohnungsunternehmen VOLKSWOHNUNG Karlsruhe geplant und in den Jahren 2008 bis 2010 umgesetzt. Hierbei wurden verschiedene Anlagentechniken und Dämmvarianten miteinander kombiniert, um insgesamt sieben unterschiedliche Szenarien zu schaffen, eine Variante für Riegel 1 und jeweils eine Sanierungsvariante für jeden Eingang von Riegel 2 und 3. Aufgrund der Ausgestaltung der Gebäude lassen sich die Varianten gut miteinander





vergleichen und somit Erfahrungen über die optimale Sanierung sammeln. Die verschiedenen Sanierungsvarianten sind in den Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.3 detailliert beschrieben und werden in Tabellen 4-1 bis 4-3 gegenübergestellt.

#### 4.2.1 Ertüchtigung der wärmeübertragenden Gebäudehülle

Riegel 1 erhielt an der Fassade und auf der obersten Geschossdecke eine 14 cm dicke Dämmschicht der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$ . Die Kellerdecke wurde von unten mit einer 8 cm dicken Dämmung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$  versehen. Die neuen, doppelverglasten Kunststoff-Fenster haben einen  $U_w$ -Wert von  $1,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ .

Riegel 2 (siehe Abb. 4-2) hingegen wurde an der Fassade mit einer 16 cm dicken Dämmung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,021 \text{ W/(mK)}$  versehen, die oberste Geschossdecke erhielt ebenfalls eine 16 cm dicke, begehbare Dämmschicht (WLG 021). Auf der Unterseite der Kellerdecke wurde eine 8 cm dicke Dämmung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,024 \text{ W/(mK)}$  angebracht. In den Wohnungen von Eingang 1 und 3 wurden doppelverglaste Kunststoff-Fenster mit einem  $U_w$ -Wert von  $1,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  eingebaut, die Wohnungen von Eingang 2 wurden mit Passivhausfenstern ausgestattet. Diese sind dreifach verglast und haben einen gemittelten  $U_w$ -Wert von  $0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Alle Fenster verfügen über einen außenliegenden Sonnenschutz mit Tageslichtlenkungssystem.

Riegel 3 wurde mit einer 9 cm dicken Sandwichkonstruktion aus Vakuumisulationspaneelen (WLG 008) und expandiertem Polystyrol (WLG 035) gedämmt. Die oberste Geschossdecke wurde mit einer 16 cm und die Kellerdecke mit einer 8 cm starken Dämmschicht der Wärme-

**Abb. 4-3:** Westfassade eines Gebäuderiegels nach der Sanierung, Quelle: E.ON ERC EBC



leitfähigkeit  $\lambda = 0,024 \text{ W/(mK)}$  versehen. Die Wohnungen von Eingang 3 wurden mit doppelverglasten Kunststoff-Fenstern mit einem gemittelten  $U_w$ -Wert von  $1,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  ausgestattet. In Eingang 1 und 2 wurden dreifach verglaste Passivhausfenster mit einem gemittelten  $U_w$ -Wert von  $0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  verbaut. Auch die Fenster in diesem Riegel verfügen über einen außenliegenden Sonnenschutz mit einem Tageslichtlenkungssystem.

#### 4.2.2 Sanierung der Anlagentechnik: Heizung und Lüftung

Riegel 1 ist an das Fernwärmenetz der Stadt Karlsruhe angeschlossen und besitzt zwei Pufferspeicher, welche im Keller von Eingang 3 aufgestellt sind. Die Wohnungen in diesem Riegel werden mit Kompaktheizkörpern beheizt. Die Abluft wird zentral über Bad und Küche abgezogen. Die Frischluft strömt über Überströmöffnungen in den Fensterrahmen in Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer nach. Dies geschieht ohne Wärmerückgewinnung.

Riegel 2 ist ebenfalls an das Fernwärmenetz angeschlossen. Pro Eingang sind zwei Pufferspeicher installiert, jeweils einer für die Bereitstellung des Trinkwarmwassers und einer zum Heizen. Die Wohnungen von Eingang 1 und 2 werden mit Kompaktheizkörpern beheizt. Die Wärme für die Wohnungen in Eingang 3 wird mit einer Fußbodenheizung bereitgestellt. Alle Wohnungen erhalten einen Handtuchheizkörper im Badezimmer.

In diesem Gebäuderiegel sind die Wohnungen in Eingang 1 nur in Küche und Bad mit Überströmöffnungen in den Fensterrahmen ausgestattet. Die Aufenthaltsräume werden über dezentrale Lüftungsgeräte belüftet, welche oberhalb der Fenster installiert sind. Die Lüftungsgeräte verfügen über zwei verschiedene Betriebsarten, welche von den Nutzer/innen selbst eingestellt werden können. Es wird unterschieden zwischen den Varianten „geringe stündliche Luftwechselrate“ ( $n_{ACH} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $\eta_{HR} = 60 \%$ ) und „hohe stündliche Luftwechselrate“ ( $n_{ACH} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $\eta_{HR} = 40 \%$ ). Eingang 2 und 3 des Riegels 2 erhielten Überströmöffnungen unterschiedlicher Hersteller in den Fensterrahmen in Kombination mit zentraler Abluft in Küche und Bad. Auf dem Dach von Eingang 3 wurde eine Solarthermie-Anlage installiert. Die Heizkörper sowie die Fußbodenheizung sämtlicher Wohnungen der Eingänge 1 und 2 sowie von zwei Wohnungen im Erdgeschoss von Eingang 3 werden durch elektronisch geregelte Zirkulationspumpen mit Heizungswasser versorgt. Die Heizung eines Raums kann von den Bewohner/innen mithilfe einer programmierbaren Einheit geregelt werden.

Riegel 3 wird mittels unterschiedlicher Typen von Wärmepumpen beheizt. Eingang 1 ist mit einer vollmodulierenden Wärmepumpe mit  $\text{CO}_2$ -Erdwärmesonden ausgestattet. Die Wohnungen dieses Eingangs werden über eine Fußbodenheizung in jedem Raum und einen Handtuchheizkörper im Badezimmer beheizt. Jede Wohnung verfügt über eine dezentrale Lüftungsanlage. Dem Schlaf-, Wohn- und Kinderzimmer wird im Standardmodus jeweils eine Luftmenge von  $n_{ACH} = 70 \text{ m}^3/\text{h}$  zugeführt. Über die Überströmzone Flur wird die Abluft in Küche und Bad geleitet und abgezogen. Die hier eingebauten Geräte verfügen über einen Wärmerückgewinnungsgrad von  $\eta_{HR} = 90 \%$ . In Eingang 2 wurden eine vollmodulierende (Master)

und eine nicht vollmodulierende (Slave) Wärmepumpe mit CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonden im Master/Slave-Modus verwendet. Die zu diesem Eingang gehörigen Wohnungen werden über ein zentrales Lüftungssystem versorgt. Dieses ist im nicht ausgebauten Dach installiert und führt die Wärme aus den zusammengeführten Abluftströmen aller Küchen und Bäder zurück. Diese Wärme und die eines Wasser-Luft-Wärmeüberträgers wird verwendet, um die den Wohnungen zugeführte Frischluft vorzuwärmen. Die Verteilung der Luft auf die einzelnen Räume findet über zentrale Ventilatoren statt, von denen in jeder Wohnung einer installiert ist.

In Eingang 3 ist das gleiche Lüftungssystem wie in Riegel 1 installiert, allerdings wird hier die Abwärme der Abluft über eine Abluft-Wärmepumpe zurückgeführt. Beheizt wird über eine Deckenheizung in jedem Raum und einen zusätzlichen Handtuchheizkörper im Badezimmer.

#### 4.2.3 Sanierung der Anlagentechnik: Trinkwarmwasser

Die Erzeugung des Trinkwarmwassers (TWW) erfolgt in Riegel 1 und in Riegel 2, Eingang 2 und 3, jeweils im Keller. Hier wird das Wasser über einen Wärmeüberträger (einmal am Tag) auf mindestens 60 °C erhitzt, um Legionellen vorzubeugen. In die Wohnungen des Eingangs 1 von Riegel 2 und des gesamten Riegels 3 wurden jeweils dezentrale Lösungen mit Nieder-temperatur-Wärmeüberträgern eingebaut. Abb. 4-4 zeigt die Einbausituation der TWW-Station im Badezimmer (links). Das rechte Foto zeigt die Frischwasserstation ohne Gehäuse mit dem schräg sitzenden Wärmeüberträger. In diesem Fall wird das Trinkwarmwasser nur bei Bedarf produziert. Der Rücklauf des Heizwassers wird von der Frischwasserstation genutzt, um das Trinkwarmwasser zu erwärmen. Durch die geringen Speicherzeiten und Speicher-

**Abb. 4-4:** Frischwasserstation zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser



mengen des Trinkwarmwassers besteht keine Gefahr der Legionellenbildung, so dass die allgemeine Systemtemperatur gesenkt werden kann. Dies soll zu geringeren Verlusten bei der Verteilung und höheren Arbeitszahlen der Wärmepumpen führen.

|       |                       | Riegel 1 Eingang 1<br>[R1.E1]                                                                                                                                               | Riegel 1 Eingang 2<br>[R1.E2] | Riegel 1 Eingang 3<br>[R1.E3] |
|-------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Bauko | Fassade               | Wärmedämmplatten D = 160 mm Hartschaum WLG 035                                                                                                                              |                               |                               |
|       |                       | U = 0,22 W/(m²K)                                                                                                                                                            |                               |                               |
|       | Fenster               | Standardfenster: Kunststofffenster, Zweischeiben-Isolierverglasung                                                                                                          |                               |                               |
|       |                       | U <sub>w</sub> = ca. 1,3 W/(m²K)                                                                                                                                            |                               |                               |
|       | Oberste Geschossdecke | Verbundelement begehbar, PUR WLG 035, D = 140 mm                                                                                                                            |                               |                               |
| TGA   | Kellerdecke           | U = 0,21 W/(m²K)                                                                                                                                                            |                               |                               |
|       |                       | Verbundelement PUR, WLG 035, D = 70 mm                                                                                                                                      |                               |                               |
|       | Heizung               | U = 0,31 W/(m²K)                                                                                                                                                            |                               |                               |
|       |                       | Fernwärme, Temperaturabsenkung zentral                                                                                                                                      |                               |                               |
|       |                       | Kompakt-Heizkörper, Fabrikat: Brötje, Typ: Excellent, Bad Handtuchheizkörper, Fabrikat Kermi, Typ: Basic50, Küche Röhrenradiatoren, Fabrikat: Zehnder, Typ: Charleston      |                               |                               |
|       | TWW                   | Niedertemperatur-Trinkwarmwasser, zentral                                                                                                                                   |                               |                               |
|       | Lüftung               | Zentr. Abluftgerät im DG für Küche u. Bad, Fabrikat: Maico Typ: ESR 20/1, dezentrales Zuluftelement im Fensterrahmen der Wohn-, Schlaf-, und Kinderzimmer, Fabrikat: Aereco |                               |                               |

**Tabelle 4-1:** Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten des Riegels 1

|       |                              | Riegel 2 Eingang 1 [R2.E1]                                                                                                                                                                                                                           | Riegel 2 Eingang 2 [R2.E2]                                                                                                                                                                                                                  | Riegel 2 Eingang 3 [R2.E3]                                                                                                                                                                                       |
|-------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bauko | <b>Fassade</b>               | Wärmedämmplatten D = 160 mm RESOL Hartschaum WLG 022<br>$U = 0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                                                           | Wärmedämmplatten D = 160 mm RESOL Hartschaum WLG 022<br>$U = 0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                                                  | Wärmedämmplatten D = 160 mm RESOL Hartschaum WLG 022<br>$U = 0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                       |
|       | <b>Fenster</b>               | Standardfenster: Kunststofffenster, Zweischeiben-Isolierverglasung, Vergrößerung Fensteröffnungen, Tageslichtlenkung Schlaf- und Kinderzimmer<br>$U_w = \text{ca. } 1,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                     | Passivhausfenster: Kunststofffenster, Dreischeiben-Isolierverglasung, Vergrößerung Fensteröffnungen, Raffstore<br>$U_w = \text{ca. } 0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                           | Standardfenster: Kunststofffenster, Zweischeiben-Isolierverglasung, Vergrößerung Fensteröffnungen, Tageslichtlenkung Schlaf- und Kinderzimmer<br>$U_w = \text{ca. } 1,3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                 |
|       | <b>Innenputz</b>             |                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                             | PCM-Platten an Decken in Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer                                                                                                                                                         |
|       | <b>Oberste Geschossdecke</b> | Verbundelement begehbar PUR WLG 024, D = 160 mm<br>$U = 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                                                                | Verbundelement begehbar PUR WLG 024, D = 160 mm<br>$U = 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                                                       | Verbundelement begehbar PUR WLG 024, D = 160 mm<br>$U = 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                            |
|       | <b>Kellerdecke</b>           | Verbundelement PUR, WLG 024, D = 80 mm, mit Holzwerkstoff kaschiert<br>$U = 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                                            | Verbundelement PUR, WLG 024, D = 80 mm, mit Holzwerkstoff kaschiert<br>$U = 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                                                   | Verbundelement PUR, WLG 024, D = 80 mm, mit Holzwerkstoff kaschiert<br>$U = 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$                                                                                                        |
|       | <b>Heizung</b>               | Fernwärme, Temperaturabsenkung zentral, dezentrale Heizungspumpen (WILO) je Heizkörper                                                                                                                                                               | Fernwärme, Temperaturabsenkung zentral, dezentrale Heizungspumpen (WILO) je Heizkörper                                                                                                                                                      | Fernwärme, Temperaturabsenkung zentral, dezentrale Heizungspumpen (WILO), Solarthermie (Aperturfl. $27 \text{ m}^2$ ) Fabrikat Paradigma, Röhrenkollektoren, Aqua-Module                                         |
| TGA   |                              | Kompakt-Heizkörper, Fabrikat: Kermi, Typ: X2-Therm, Bad Handtuch Heizkörper, Fabrikat Kermi, Typ: Basic50, Küche Röhrenradiatoren, Fabrikat: Zehnder, Typ: Charlston                                                                                 | Kompakt-Heizkörper, in 5 Wohneinheiten Fabrikat: Kermi, Typ: X2-Therm, in 5 Wohneinheiten Fabrikat: Brötje, Typ Excellent, Bad Handtuchheizkörper, Fabrikat Kermi, Typ: Basic50, Küchen Röhrenradiatoren, Fabrikat: Zehnder, Typ: Charlston | Fußbodenheizung Fabrikat: Joco, System Klimaboden Top2000, Bad Handtuchheizkörper, Fabrikat Kermi, Typ: Basic50                                                                                                  |
|       | <b>TWW</b>                   | Niedertemperatur-Trinkwarmwasser, dezentral als Wohnungs-Frischwasserstation, Fabrikat: Varmeco, Typ: VARIO fresh-nova 20                                                                                                                            | Zentrale TWW-Erwärmung mit Heizkörperpufferspeicher und Frischwassermodul, Fabrikat: Varmeco, Typ: FWE-Modul 40                                                                                                                             | Zentrale TWW-Erwärmung mit Heizkörperpufferspeicher und Frischwassermodul, Fabrikat: Varmeco, Typ: FWE-Modul 40                                                                                                  |
|       | <b>Lüftung</b>               | Dezentrales Lüftungssystem, Fabrikat SCHÜKO, WRG über Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmerfenster, zentrales Abluftgerät im DG für Küche u. Bad, Fabrikat: Maico, Typ: ESR 20/1, dezentrale Zuluft-elemente im Fensterrahmen Küche + Bad, Fabrikat Aereco | Zentr. Abluftgerät im DG für Küche u. Bad, Fabrikat Maico, Typ: ESR 20/1, dezentrales Zuluftelement im Fensterrahmen der Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmerfenster, Fabrikat Aereco                                                            | Zentr. Abluftgerät im DG für Küche u. Bad, Fabrikat Maico, Typ: ESR 20/1, dezentrales Zuluftelement im Fensterrahmen Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmerfenster, Fabrikat KöClimat plus 2 und Rahmenlüfter Regel Air |

**Tabelle 4-2:** Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten des Riegels 2

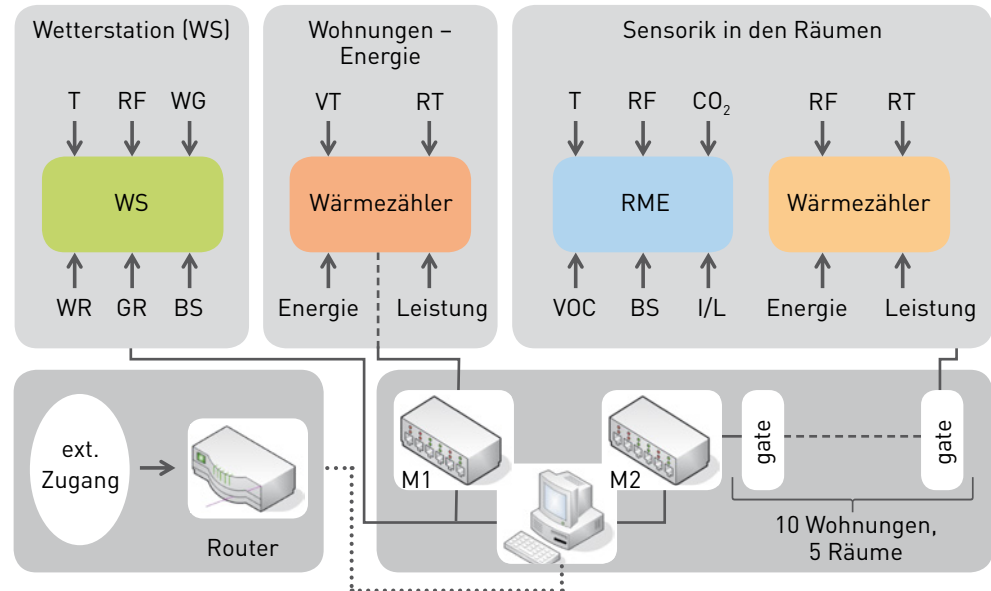
|       |                              | Riegel 3 Eingang 1 [R3.E1]                                                                                                                                                                                                                                             | Riegel 3 Eingang 2 [R3.E2]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Riegel 3 Eingang 3 [R3.E3]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bauko | <b>Fassade</b>               | Vakuumverbunddämmplatten: VIP - Paneel D = 40 mm Decklage EPS WLG 035, D = 50 mm<br>$U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                          | Vakuumverbunddämmplatten: VIP - Paneel D = 40 mm Decklage EPS WLG 035, D = 50 mm<br>$U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Vakuumverbunddämmplatten: VIP - Paneel D = 40 mm Decklage EPS WLG 035, D = 50 mm<br>$U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|       | <b>Fenster</b>               | Passivhausfenster: Kunststofffenster, Dreischeiben-Isolierverglasung, Vergrößerung Fensteröffnungen, Raffstore<br>$U_w = \text{ca. } 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                               | Passivhausfenster: Kunststofffenster, Dreischeiben-Isolierverglasung, Vergrößerung Fensteröffnungen, Raffstore<br>$U_w = \text{ca. } 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                                                            | Standardfenster: Kunststofffenster Zweischeiben-Isolierverglasung, Vergrößerung Fensteröffnungen, Raffstore<br>$U_w = \text{ca. } 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                      |
|       | <b>Oberste Geschossdecke</b> | Verbundelement begehbar PUR WLG 024, D = 160 mm<br>$U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                           | Verbundelement begehbar PUR WLG 024, D = 160 mm<br>$U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Verbundelement begehbar PUR WLG 024, D = 160 mm<br>$U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|       | <b>Kellerdecke</b>           | Verbundelement PUR WLG 024, D = 80 mm, mit Holzwerkstoff kaschiert<br>$U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                        | Verbundelement PUR, WLG 024, D = 80 mm, mit Holzwerkstoff kaschiert<br>$U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Verbundelement PUR WLG 024, D = 80 mm, mit Holzwerkstoff kaschiert<br>$U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|       | <b>Heizung</b>               | Wärmepumpe mit CO <sub>2</sub> -Sonde, Fabrikat: Heliotherm, Typ: HP28E-WEB, 6,33 kW <sub>el</sub><br><br>Beheizung über Fußbodenheizung mit Niedertemperatur, Fabrikat: Joco, Typ: Klimaboden TOP2000<br><br>im Bad Handtuchheizkörper, Fabrikat: Kermi, Typ: Basic50 | 2 Wärmepumpen, CO <sub>2</sub> -Sonde, Fabrikat: Heliotherm, Typ: HP28E-WEB, 2x2,85 kW <sub>el</sub><br><br>Dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und Nachheizregister zur Beheizung aller Räume der Wohnung mit Luft, Typ Frischluftheizung TSLH-150/600-G, Fabrikat: Schmeißer<br><br>im Bad Handtuchheizkörper, Fabrikat: Kermi, Typ: Basic50                                                                                         | Wärmepumpe Luft/Split modulierend, Fabrikat: Heliotherm, Typ HP30-L-M-WEB, 9,6 kW <sub>el</sub> ; Abluft-Wärmepumpe Fa. Schmeißer zur Erzeugung von WW, 1,25 kW <sub>el</sub><br><br>Rechte Seite [5 Wohnungen] Deckenheizung/-Kühlung, Fabrikat: Joco, System Klimaboden TOP2000, linke Seite [5 Wohnungen] Fabrikat: Joco, System KW-8ti<br><br>im Bad Handtuchheizkörper, Fabrikat: Kermi, Typ: Basic50 |
| TGA   | <b>TWW</b>                   | Niedertemperatur-Trinkwarmwasser, dezentral als Wohnungs-Frischwasserstation, Fabrikat: Heliotherm                                                                                                                                                                     | Niedertemperatur-Trinkwarmwasser, dezentral als Wohnungs-Frischwasserstation, Fabrikat: Varmeco, Typ: F+G/Samson                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Niedertemperatur-Trinkwarmwasser, dezentral als Wohnungs-Frischwasserstation, Fabrikat: Varmeco, Typ: VARIO fresh-nova 20                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|       | <b>Lüftung</b>               | Dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung je Wohneinheit, Fabrikat: Schmeißer, Typ: Lüftungsmodul TSL-150-G/DC, Zuluft in Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer, Abluft in Küche und Bad, Luftverbund über Lüftungsgitter in Zimmertüren                              | Zentrale Lüftungsgeräte mit WRG je Wohneinheit im DG, je Wohnungseinheit eine Lüftungseinheit mit Heizregister zur Beheizung aller Räume der Wohnung mit Luft, Fabrikat: Lufttechnik Schmeißer, Typ Lüftungsgerät im DG: GSL 1000-G/EMC, Heizmodul TSH-600-EC, Fabrikat: Lufttechnik Schmeißer, Typ Lüftungsmodul: TSL-150-G/DC, Zuluft in Wohn-, Schlaf- und Kinderzimmer, Abluft in Küche und Bad, Luftverbund über Lüftungsgitter in Zimmertüren | Zentrale Abluftanlage, Zuluft über Fenster, Wärmerückgewinnung durch Abluftführung über Wärmepumpe, Fabrikat: Lufttechnik Schmeißer, Typ: TSWp-AB/W-6.0 DV, Fabrikat Ablüfter: Maico, Abluftelemente LBM/Conit, Abluft in Fensterrahmen der Zimmer, Luftverbund über Lüftungsgitter in Zimmertüren                                                                                                         |

**Tabelle 4-3:** Gegenüberstellung der Sanierungsvarianten des Riegels 3

### 4.3 Das Monitoring-System

Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen wurde ein umfangreiches, hochauflösendes Monitoring-System installiert, um die Effizienz der energetischen Maßnahmen bewerten zu können. Das System wurde von der Fachhochschule Karlsruhe unter der Leitung von Prof. Wolfrum konzipiert und installiert. Die vorhandenen Messdaten geben Auskunft über den Energieverbrauch für die Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Trinkwarmwasser und Heizwärme. Zudem erfasst das Monitoring-System Wetterdaten und Parameter, um den thermischen Komfort im Gebäudeinneren bewerten zu können. Eine schematische Darstellung des Monitoring-Systems zeigt Abb. 4-5.

**Abb. 4-5:** Schematische Darstellung des Monitoring-Systems



#### 4.3.1 Messung des Energieverbrauchs für Erzeugung, Speicherung und Verteilung

In Riegel 1 und 2 wurden im Keller zwei Wärmemengenzähler installiert, die die aus dem Fernwärmesetz gelieferte Wärmemenge messen. Des Weiteren werden Temperaturmessungen in jedem Speicher jedes Riegels bzw. Eingangs durchgeführt. Zusätzlich sind zwei weitere Messstellen in den Riegeln 2 und 3 hinter jedem Pufferspeicher installiert. So kann getrennt voneinander betrachtet werden, welche Wärmemenge jeweils benötigt wird, um Trinkwarmwasser und Heizwärme bereitzustellen. In Riegel 3 werden die Wärmepumpen bezüglich der verbrauchten



Energiemenge an elektrischer Energie und der gelieferten Wärmemenge aufgezeichnet. In allen Eingängen von Riegel 2 und 3 wird die allgemeine Hilfsenergie gemessen. Zudem werden die Temperaturen in den Erdwärmesonden der Wärmepumpen in verschiedenen Tiefen erfasst.

In Riegel 2 und 3 werden in den einzelnen Wohnungen im Minutentakt die Vor- und Rücklauftemperatur, der Volumenstrom sowie die Wärmemenge für das Heizen gemessen. Um den Energieverbrauch für die Bereitstellung des Trinkwarmwassers zu messen, sind wohnungsweise in Riegel 2, Eingang 1 und in Riegel 3 Messgeräte installiert. Im 1. und 2. OG dieser beiden Gebäude sind raumweise zusätzlich Wärmemengenzähler installiert. Bis auf die Messungen im Keller, die im 15-Minuten-Takt erfolgen, werden alle Messungen im Minutentakt durchgeführt.



**Abb. 4-6:** Details der Sensoren (Wärmemengenzähler, links) und der Daten-Logging-Station (rechts)

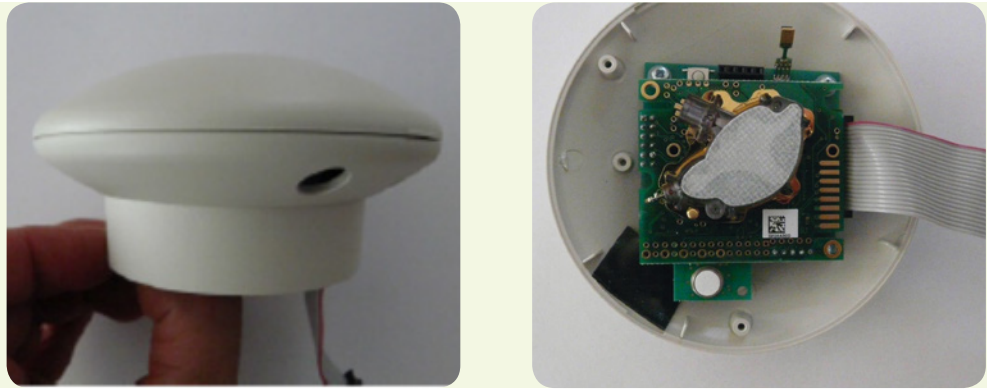
#### 4.3.2 Messungen der Luftqualität und thermischen Behaglichkeit

Prof. Wolfrum (Fachhochschule Karlsruhe) hat eine Raum-Mess-Einheit (RME) entwickelt, die für jeden Raum Daten zur Luftqualität und thermischen Behaglichkeit misst (siehe Abb. 4-7). Sie erfasst die Innenlufttemperatur, die relative Luftfeuchte, den Kohlenstoffdioxid-gehalt sowie flüchtige organische Verbindungen (VOC „Volatile Organic Compounds“). Des Weiteren wird die allgemeine Beleuchtungsstärke (Lux) als Verhältnis des infraroten zum sichtbaren Licht gemessen, um auch zwischen verschiedenen Lichtquellen unterscheiden zu



können, zum Beispiel der Sonne, Glühlampen und Leuchtstofflampen. Über Kontaktsensoren im Blendrahmen kann festgestellt werden, wann ein Fenster geöffnet bzw. geschlossen ist. Hierbei wird nicht unterschieden, ob das Fenster gekippt oder vollständig geöffnet ist (und in welchem Winkel). Die Raum-Mess-Einheiten produzieren durch die eigene Elektronik selbst auch Wärme. In einem Laborversuch wurde diese Wärmeentwicklung mit 2,5 K quantifiziert. Bei der Messdatenauswertung werden daher die gemessenen Temperaturen um 2,5 K reduziert. Im ersten Riegel sind lediglich sieben Wohnungen mit Raum-Mess-Einheiten ausgestattet, wohingegen in den anderen Gebäuderiegeln in jedem Raum eine Einheit installiert ist.

**Abb. 4-7:** Raum-Mess-Einheit (RME)



Ergänzend zu den Raum-Mess-Einheiten zeichnen die dezentralen Heizpumpen ebenfalls Daten zur Raumtemperatur und der eingestellten Solltemperatur auf. Dies geschieht in den Räumen der Wohnungen von Riegel 2 in den Eingängen 1 und 2 sowie im 1. OG von Eingang 3. In den Wohnungen von Riegel 3, Eingang 2, wird im 1. und 2. OG die Lufttemperatur der zugeführten Frischluft gemessen. Auf sämtlichen Außenwänden der Riegel 2 und 3 wurden jeweils auf drei unterschiedlichen Höhen Temperatursensoren sowohl in der Trennschicht zwischen Außenwand und Dämmung als auch zwischen Dämmung und Außenputz angebracht. Das Messintervall beträgt eine Minute.

#### 4.3.3 Installierte Wetterstation

Auf dem Dach des Eingangs 3 von Riegel 2 wurde eine Wetterstation installiert. Hier werden lokale Daten zur Umgebungstemperatur, zur relativen Feuchte der Umgebungsluft, zur globalen Sonneneinstrahlung und Helligkeit sowie zur Windrichtung und -geschwindigkeit erhoben. Diese Daten werden im Minutentakt aufgezeichnet.

## 4.4 Datenmanagement

Durch die Vielzahl der installierten Sensoren werden ungefähr sechs Millionen Messwerte pro Tag aufgezeichnet und auf einem Server gespeichert. Diese Daten werden nach dem zugehörigen Sensor sortiert und in einer einzigen Datei im „dat“-Format in einer komplexen codierten Ordnerstruktur gespeichert.

Um schnell auf diese Daten zugreifen zu können, werden die gesammelten Daten in größeren Dateien zusammengefasst. Das Format dieser Dateien ist das „Hierarchical Data Format“ (HDF5). Diese Dateien werden in „Groups“ (Gruppen, vergleichbar mit einem Ordner unter dem Betriebssystem Windows) und „Leafs“ (Blätter, vergleichbar mit einer Datei unter dem Betriebssystem Windows) aufgeteilt. Der Vorteil hierbei ist, dass Leafs einen mehrdimensionalen Array (Bereich) mit verschiedenen Datentypen beinhalten können (z. B. int, float32, float64, string). Groups und Leafs ermöglichen es, die Daten mit „Attributes“ (Merkmale) zu beschreiben.

Die HDF5-Dateien, welche ausschließlich für dieses Forschungsvorhaben generiert wurden, enthalten die „Attribute“-Informationen über die gemessene Einheit. Einer der größten Vorteile bei der Nutzung von HDF5 ist die Möglichkeit, direkt auf die Daten eines benötigten Leaf zugreifen zu können, ohne dafür das gesamte Datenfile laden zu müssen.

### 4.4.1 Herstellung von HDF5-Dateien

Die Strukturierung der gewonnenen Daten ist an die Geometrie der Gebäude angelehnt. Dies erleichtert den Umgang mit den Daten, auch wenn man noch nicht damit vertraut ist. Um eine HDF5-Datei zu generieren, wurde ein Python-Skript erstellt, welches hauptsächlich auf den Libraries „Numpy“ und „H5Py“ sowie einigen selbst entwickelten Libraries basiert. Eine HDF5-Datei enthält jeweils die Daten eines Monats und benötigt dafür einen Speicherplatz von ca. einem Gigabyte.

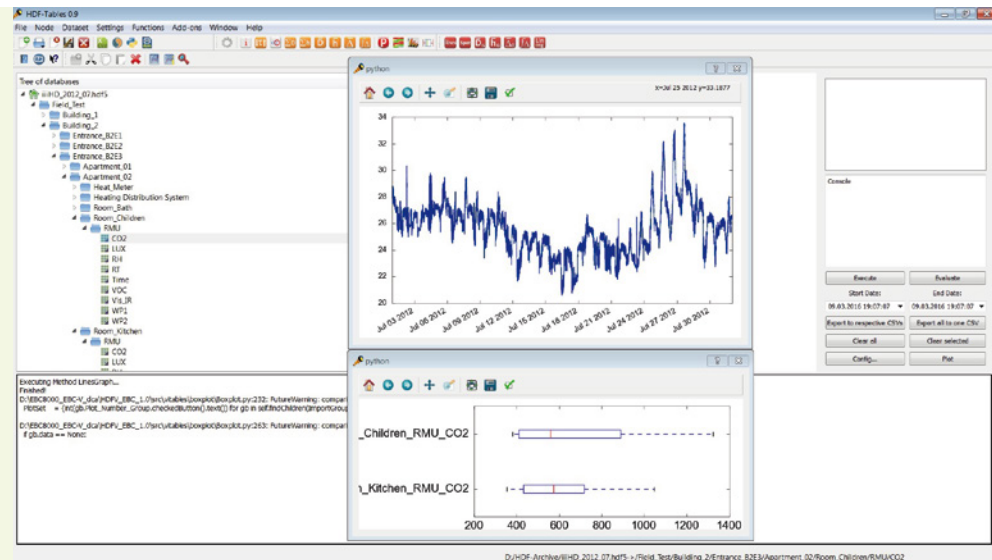
### 4.4.2 HDF5-Viewer zur Visualisierung und Analyse von Messdaten

Während der vergangenen Jahre wurde eine Plattform entwickelt, die es ermöglicht, Daten auf schnelle und einfache Art auszuwerten. Sie basiert auf der lizenzfreien Python-Software „ViTables“. Dieses Freeware-Programm bietet die Visualisierung der Datenstruktur und die Generierung eines einfachen 2-D-Plots der Daten. Die neu entwickelte Software bietet mehrere unterschiedliche Arten der Visualisierung und verschiedene Auswertungswerkzeuge an. Dazu gibt es verschiedene Input- und Output-Schnittstellen. Diese Funktionen basieren hauptsächlich auf den Libraries „NumPy“, „matplotlib“ und „Pandas“. Einen Screenshot der Benutzeroberfläche (GUI) des innerhalb dieses Projekts weiterentwickelten HDF-Viewers zeigt Abb. 4-8.

Die Benutzeroberfläche teilt sich in fünf Bereiche auf. Zum einen steht ein Werkzeugkoffer mit den Import- und Auswertungswerkzeugen zur Verfügung. Der Viewer ermöglicht den Import von .csv-, .dat- und matlab-Files sowie von Daten aus MySQL-Datenbanken. Zum anderen bietet der „Tree of Database“ eine Ansicht der Baumstruktur der HDF5-Datei, die bearbeitet werden kann. Im „Workspace“ können Leafs in Form von Matrizen visualisiert werden. Der „Data Editor“ ermöglicht es, die Daten mit einem der vorhandenen Werkzeuge auszuwerten. Zusätzlich kann dies in der zur Verfügung gestellten Python-Konsole mit einem individuellen Auswertungsprogramm geschehen. Daneben bietet der Data-Editor die Möglichkeit, Ergebnisse in CSV-Dateien abzuspeichern. Im „Logger“ werden die Ergebnisse numerischer Auswertungen ausgegeben.

Der Viewer zeichnet sich unter anderem durch die flexible Möglichkeit aus, selbst entwickelte Plug-ins in der universellen Sprache Python zu verwenden. Eine detaillierte Beschreibung des Werkzeugkoffers findet sich im Benutzerhandbuch, das ebenfalls im Rahmen dieses Projekts entstanden ist.

**Abb. 4-8:** Screenshot des HDF5-Viewers, Quelle: E.ON ERC EBC



## 5 Die Sicht der Bewohner/innen versus gemessener Energieverbrauch

Autoren: Florian Heesen, Reinhard Madlener

Wie in Kapitel 6 gezeigt wird, bestehen große Unterschiede zwischen den Energieverbrauchswerten einzelner Wohnungen. Diese Abweichungen können teilweise auf das Verhalten der Bewohner/innen zurückgeführt werden. Die zentrale Frage dieses Kapitels ist daher, wie das für den Energieverbrauch relevante Verhalten der Bewohnerschaft energieeffizient sanierter Wohnungen ermittelt und bewertet werden kann. Um ein aussagekräftiges Bild des Verbrauchsverhaltens dieser Bewohner/innen zu erlangen, wurden vom Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) und dem Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC) der RWTH Aachen University sowohl eine qualitative als auch eine quantitative Befragung durchgeführt. Die qualitative Befragung bildete gleichzeitig die Grundlage für die Entwicklung der Fragebögen. Die so erlangten Einblicke in das Nutzerverhalten wurden dann mit den gemessenen Werten aus dem Monitoring verglichen. Aus dieser Analyse ergaben sich verschiedene Perspektiven auf das spezifische und typisch heterogene Energieverbrauchsverhalten.

Das Bewohnerverhalten ist nicht nur als ökonomisch sinnvolle Reaktion auf die im Zuge der Sanierungen gesunkenen Kosten der Energieversorgung zu verstehen. Die Preiselastizität der Nachfrage subsummiert eine Reaktion, welche auch von physiologischen, psychologischen und technischen Faktoren beeinflusst wird. Um die Analysen im Verhältnis zu anderen Forschungsvorhaben bzw. deren Ergebnisse einschätzen zu können, sollen im Folgenden die mikroökonomischen Zusammenhänge kurz vorgestellt werden. Die einer Energieeffizienzmaßnahme zugrunde liegenden Grundzusammenhänge lassen sich schematisch durch das auf den folgenden Seiten vorgestellte Modell illustrieren. Hierdurch können das Forschungsprojekt in Verbindung mit anderen Projekten analysiert und die Ergebnisse eingeordnet werden.

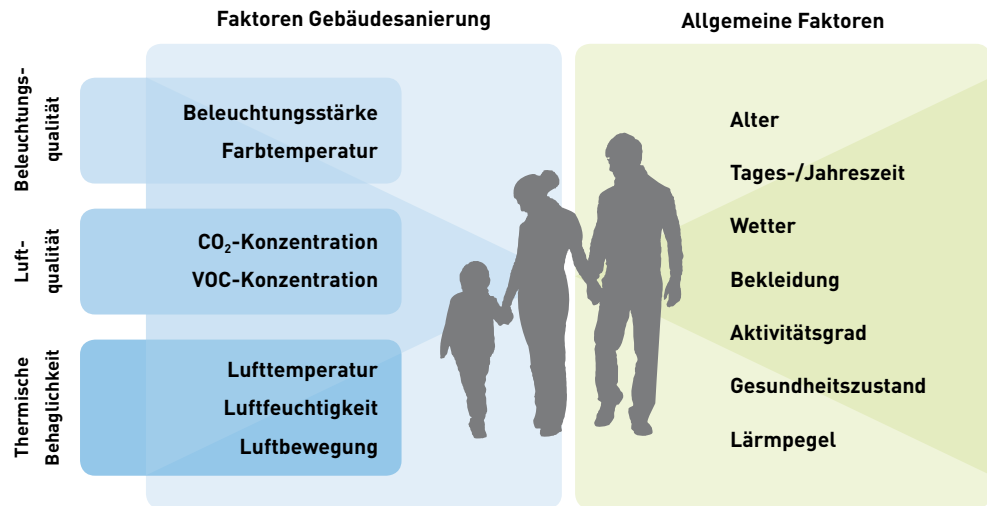
### 5.1 Mikroökonomische Grundzusammenhänge des Energieverbrauchsverhaltens

Haushalte verbrauchen Energie nicht per se, sondern um durch Energiedienstleistungen ihr Wohlbefinden bzw. ihren Nutzen zu steigern. Das generelle Wohlbefinden eines Menschen ist Forschungsgegenstand vieler verschiedener Fachrichtungen. Die Komplexität liegt insbesondere darin, dass nahezu sämtliche Bereiche des Lebens Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden haben. Beispielsweise kann das Wohlbefinden von medizinischer Seite aus betrachtet werden, genauso aber von der ökonomischen oder der sozialen Seite (Schumacher

et al. 2003). Zusätzlich gibt es kein allgemeingültiges, sondern nur ein subjektives und damit individuelles Wohlbefinden. Jeder Mensch reagiert anders und hat andere Ansprüche und Vorstellungen, die für das individuelle Wohlbefinden erfüllt sein müssen. In der Psychologie wird das Wohlbefinden daher konsequenterweise in subjektives und objektives Befinden unterteilt (Diener 2009). Hierbei steht das subjektive Wohlbefinden für die selbst wahrgenommene Zufriedenheit im Leben, während das objektive Wohlbefinden für die körperlichen und ökonomischen, also die objektiv messbaren Einflüsse steht. Für beide Komponenten zusammen wird in der Literatur auch der Begriff der „Lebensqualität“ als Synonym für den Begriff „Wohlbefinden“ verwendet. Eine klare Abgrenzung ist aber auch bei dieser Einteilung nur schwerlich gegeben, da sich objektive Elemente auf das subjektive Wohlbefinden auswirken können und umgekehrt. Zum Beispiel beeinflusst eine ökonomisch schwere Phase häufig auch die wahrgenommene Zufriedenheit und damit das subjektive Befinden eines Menschen.

Um das menschliche Wohlbefinden zu bestimmen, werden verschiedene Ansätze in der Literatur beschrieben. Diese definieren unterschiedliche Indikatoren, die das menschliche Befinden greifbar machen sollen. Mit Blick auf das Thema dieser Publikation können zahlreiche dieser Indikatoren (zunächst) ausgeblendet werden. Auch spielt der psychologische Ausgangszustand der Bewohner/innen eine untergeordnete Rolle, da bei einer Sanierung insbesondere die baulichen Verbesserungen untersucht werden. Abbildung 5-1 stellt mögliche Einflussfaktoren auf das menschliche Wohlbefinden dar. Sie zeigt sowohl die Faktoren, welche durch eine Sanierung beeinflusst werden können, als auch allgemeine Einflussfaktoren, die in diesem Zusammenhang wichtig sind.

**Abb. 5-1:** Einflussfaktoren auf das menschliche Wohlbefinden



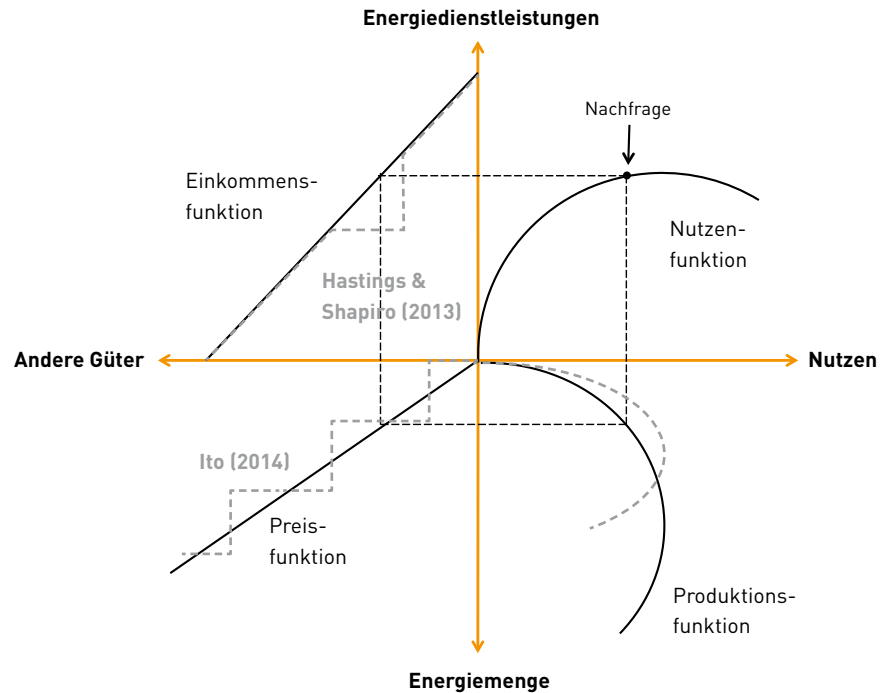
Die in Abbildung 5-1 genannten Faktoren bilden die Eingangsparameter für die sogenannte Produktions- bzw. Konsumfunktion eines Haushalts. Diese beiden Funktionen bilden ein Gleichgewicht, wenn Angebot und Nachfrage in Einklang gebracht werden können. Diese Form der Analyse eines Haushalts bzw. eines Nutzenden als Produzent sowie Konsument geht auf die Arbeit von Becker [1965] zurück. Das Konzept erweist sich als gut übertragbar auf den Forschungsgegenstand. Demnach gelten Haushalte zunächst als Produzenten, indem sie mit der ihnen zur Verfügung stehenden Technik die genannten Einflussfaktoren ihrer Gebäudeumgebung beeinflussen. Danach erst ergibt sich für den Haushalt die Möglichkeit, als Konsument dieser Faktoren in Erscheinung zu treten. Durch diese getrennte Betrachtung werden die unterschiedlichen Einflüsse deutlich, die in einem Gleichgewicht zueinander stehen müssen. Außerdem können unterschiedliche Einflüsse auf das Verhalten so ihren unterschiedlichen Quellen zugeordnet werden.

Technische, physiologische und psychologische, aber auch ökonomische Einflüsse wirken an unterschiedlichen Punkten auf das menschliche Verhalten ein und müssen daher getrennt betrachtet werden. Nur wenn die Grundzusammenhänge der Einflussfaktoren bekannt sind, können zukünftige Maßnahmen und deren Erfolgswahrscheinlichkeit fundiert bewertet werden. Als Beispiel lässt sich an dieser Stelle die Raumtemperatur als Energiedienstleistung nennen. Diese ist nicht nur von der Nachfrageseite und damit ökonomisch determiniert, sondern ergibt sich auch zu großen Teilen aus den technischen Gebäudeparametern. Die technischen Gebäudeparameter sind dabei als Produktionsfaktoren zu identifizieren. Darüber hinaus steht auf der Nachfrageseite der physiologische Wärmeausgleich des Körpers und somit die menschliche Natur. Auf Grundlage dieser Zusammenhänge lässt sich ein Modell formulieren, welches eine konkrete Aussage bzgl. der Veränderung des Verhaltens erlaubt, wenn sich beispielsweise die Effizienz der Produktion der Energiedienstleistung Raumwärme ändert.

Damit die genannten Faktoren theoretisch erklärt bzw. analysiert werden können, wird an dieser Stelle das Heizenergie-Konsum-Modell eingeführt. Grafisch ist es in Abbildung 5-2 dargestellt. Es basiert auf der Arbeit von Scott [1980] und bildet technische, physiologische, psychologische sowie ökonomische Faktoren und Zusammenhänge ab. Durch die geschlossene Darstellung ergibt sich die Möglichkeit, ein Gleichgewicht herzuleiten und Veränderungen mithilfe komparativer Statik zu evaluieren. Die komparative Statik ermöglicht Aussagen darüber, wie sich welche Parameter eines Modells insgesamt ändern, wenn ein oder mehrere der in ihm abgebildeten Parameter variiert werden.

Das Heizenergie-Konsum-Modell basiert auf einem kartesischen Koordinatensystem, in dessen Quadranten vier voneinander abhängige Funktionen dargestellt sind: die des Einkommens, des Preises, des Nutzens und der Produktion. Diese sollen im Folgenden kurz erläutert und ein Einblick in die Wirkungszusammenhänge gegeben werden.

**Abb. 5-2:** Schema des Heizenergie-Konsum-Modells



Als ökonomische Einflussgrößen sind in diesem Modell sowohl die Einkommens- als auch die Preisfunktion in den linken beiden Quadranten abgebildet. Der Einfluss des zur Verfügung stehenden Kapitals und des Energiepreises spielt eine wichtige und in der einschlägigen Literatur hinlänglich beschriebene Rolle (Varian 1992). Allerdings gibt es sowohl für die Einkommens- als auch für die Preisfunktion neuere mikroökonomische Erkenntnisse, die Auswirkungen auf die hier beschriebene Forschung haben. Dass der Konsument sein Einkommen nicht marginal alloziert, d. h. wie in der oben stehenden Abbildung dargestellt, sondern nach Güterklassen bündelt, wird von Hastings und Shapiro (2013) gezeigt. Wie Ito (2014) zeigt, reagieren Konsumenten auf durchschnittliche (grau gestrichelte Linie) anstatt auf marginale Energiepreisänderungen (dargestellt durch die schwarz eingezeichnete Preisfunktion). Diese neueren Erkenntnisse betreffen die Wirkungsmechanismen des Einflusses der ökonomischen Faktoren auf den Energieverbrauch im Vergleich zu einer neoklassischen Betrachtung.

Im rechten unteren Quadranten ist die Haushalts-Produktionsfunktion abgebildet. Diese stellt die Beziehung zwischen Energie-Input und erreichtem Nutzen dar. Die Produktionsfunktion ist abhängig von der Effizienz der Anlage und den physiologischen Grundprinzipien des menschlichen Körpers. Aus dieser Abhängigkeit ergibt sich der charakteristische Verlauf der Funktion mit einem eindeutigen globalen Maximum. Im rechten oberen Quadranten hingegen ist die tatsächliche Entscheidung der Nutzenden abgebildet. Ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage ist nötig, um Veränderungen mithilfe der sogenannten komparativ-statischen Analyse untersuchen zu können. Der Erklärungsgehalt des Modells wird durch diese Annahmen nicht wesentlich beeinflusst, wie die folgenden Überlegungen anhand eines Beispiels zeigen.

Das Heizenergie-Konsum-Modell ermöglicht Aussagen darüber, was bei der Veränderung externer Einflüsse bezüglich des menschlichen Verhaltens zu erwarten ist und welchen Effekt dies auf die betrachteten Faktoren hat. Indem man den Nutzen eines Heizenergiesystems auf diese Weise messbar macht, wird auch der Einfluss auf die Bewohnerschaft realistisch abgebildet. Zum Beispiel lässt sich eine energetische Sanierung als Energieeffizienzsteigerung und somit als externer Einfluss betrachten. Durch diese Steigerung ändert sich zunächst die Produktionsfunktion. Mit weniger Energie-Input werden dieselben Nutzenniveaus erzielt wie vor der Sanierung (in Abbildung 5-2 durch die grau gestrichelte Produktionsfunktion dargestellt). Ob sich letztlich eine Verhaltensänderung einstellt, hängt maßgeblich von dem Nutzenniveau ab, das vor der Sanierung erreicht worden ist. Sind Nutzer/innen schon vorher nahe am Maximum, wird eine Effizienzsteigerung nicht dazu führen, dass sie ihre Energienachfrage signifikant steigern, um den Nutzen weiter zu erhöhen. Sind die Nutzer/innen jedoch weit von ihrem maximalen Nutzen entfernt, werden sie wahrscheinlich Teile ihrer durch die Effizienzmaßnahme eingesparten Kosten nutzen, um ihr Nutzenniveau zu erhöhen. Jede Erhöhung des Nutzenniveaus geht dabei mit einer Erhöhung des Energie-Inputs (größerer Energiekonsum) einher.

Dieses Phänomen wird bei Roy (2000) für unterentwickelte Ausgangssituationen mit dem Begriff „unmet demand“ beschrieben, d. h. einer vorhandenen Nachfrage, welche von einer gesättigten Nachfrage abzugrenzen ist. Im Fall einer gesättigten Nachfrage hat der indirekte Rebound-Effekt, bei dem durch die frei werdenden finanziellen Ressourcen andere Güter und (Energie-)Dienstleistungen nachgefragt werden, die größeren Auswirkungen. Dieser Effekt wird in dieser Publikation nicht weiter betrachtet, ist aber z. B. bei Thomas & Azevedo (2013) im Detail beschrieben. Es bleibt festzuhalten, dass alle frei werdenden Ressourcen durch jegliche Effizienzsteigerungen immer wieder neu alloziert werden. Hier kommt es letztlich auf die Energieintensität aller Güter sowie anderer makroökonomischer Effekte an, um eine Aussage über die zu erwartenden Energieeinsparungen machen zu können.



## 5.2 Qualitative und quantitative Befragung der Bewohnerschaft

Nachdem in Kapitel 5.1 das Bewohnerverhalten theoretisch analysiert wurde, soll im Folgenden die Sichtweise der Bewohner des Forschungsprojekts dargestellt werden.

### 5.2.1 Durchführung der qualitativen Befragung und Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Im Rahmen der qualitativen Interviews im Juni 2013 wurden in Riegel 2 und Riegel 3 insgesamt zwölf Haushalte hinsichtlich ihrer Erfahrungen mit der Sanierung und ihrer Meinung dazu befragt. Die Interviews waren semi-strukturiert, d. h. sie folgten einem vorgegebenen Leitfaden ohne Antwortmöglichkeiten vorzugeben, und ließen dadurch Raum für bisher unbekannte oder bewusst ignorierte Wirkungszusammenhänge und spontane Erfahrungsberichte der Bewohner/innen. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Informationen – u. a. zu den Heizgewohnheiten, zum persönlichen thermischen Komfort, zum Grad ihrer Fähigkeit, das Heizsystem zu bedienen, und zur Motivation, Energie zu sparen – als Leitfaden formuliert und später durch persönliche Interviews abgefragt. Außerdem wurden das allgemeine Energiekonsumverhalten sowie Meinungen zur Funktionsweise und Eignung der Heizsysteme mit einbezogen. Die Erkenntnisse aus den Interviews tragen zu einem besseren Verständnis des Verhaltens, der Einstellungen und der Erfahrungen in energieeffizient sanierten Gebäuden bei. Aus der Befragung lassen sich außerdem Hypothesen zur weiteren Analyse des Energieverbrauchsverhaltens der Bewohnerschaft für den Fragebogen ableiten.

Die transkribierten Interviews wurden ausgewertet und codiert. Das Codieren dient dazu, häufig auftretende, verwandte oder ähnliche Sachzusammenhänge zu sortieren und anschließend zu quantifizieren. Auf dieser Grundlage lassen sich die von den Bewohnern/innen berichteten Erfahrungen in folgende fünf Hauptthemen unterteilen:

1. Rein technische Probleme
2. Fehlende Übereinstimmung der Arbeitsweise der Technik mit den Lebensgewohnheiten der Bewohner/innen
3. Zu komplexe Bedienung technischer Geräte
4. Vermischung der Probleme 1., 2. und 3. und zusätzlich Verunsicherung der Bewohner/innen, welche Strategie zur Bewältigung der Probleme anzuwenden ist
5. Allgemeines Heizverhalten der Bewohner/innen

Diese Ergebnisse spannen mit den Daten des Monitoring eine Verhaltensmatrix auf, die weiter erforscht wurde. Insbesondere rückt durch die Ergebnisse der qualitativen Interviews in den Fokus, dass technische Probleme und Merkmale des Heizenergiesystems von den hier betrachteten Einflüssen menschlichen Handelns deutlich abgegrenzt werden müssen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden die Fragebögen konstruiert und die weitere Forschung entsprechend angepasst.

### 5.2.2 Sozialpsychologische Modelle als Erklärung des Energieverbrauchsverhaltens

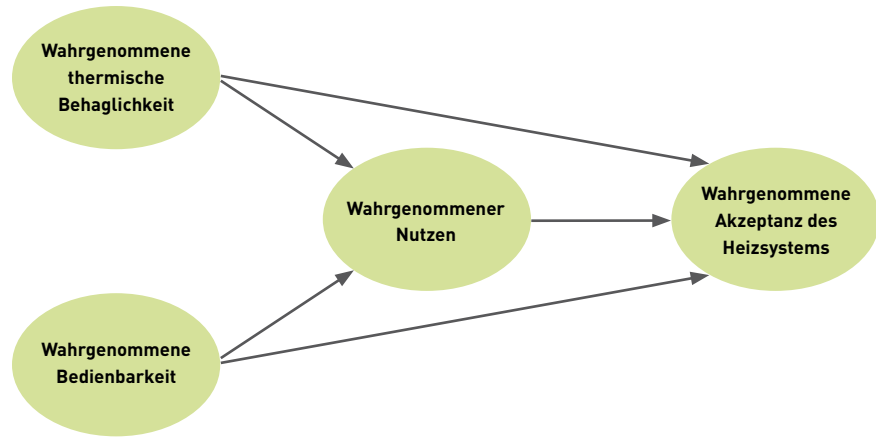
Im Laufe des Forschungsvorhabens wurden verschiedene sozialpsychologische Modelle auf die Anwendbarkeit im gegebenen Forschungszusammenhang überprüft. Dabei dient die Theorie des geplanten Verhaltens von Ajzen (1991) dazu, das Energieverbrauchsverhalten der Bewohnerschaft zu untersuchen. Sie stellt zugleich die Grundlage für das Technology Acceptance Model (TAM) von Davis (1989) dar, welches zur Untersuchung der Technikakzeptanz dient. Neben der inhaltlichen Nähe dieser theoretischen Ansätze wurde das Technology Acceptance Model auch deshalb ausgewählt, weil es in der Praxis auf die beschriebene Situation der Bewohner/innen von energieeffizienten Haushalten sehr gut anwendbar ist. Durch die Theorie des geplanten Verhaltens kann dargestellt werden, welchen Einfluss einzelne latente, das heißt nicht direkt beobachtbare Einflüsse – wie die wahrgenommene Bedienbarkeit der Heizung – auf den Nutzen bzw. die Nutzungsweise des Systems haben. Das Akzeptanzmodell untersucht explizit, welche Faktoren für die Akzeptanz einer Technik ausschlaggebend sind.

In den hier dargelegten Forschungsergebnissen wird im Wesentlichen zwischen menschlichen und technischen Faktoren unterschieden, um zu hinterfragen, welchen Einfluss und welche relative Bedeutung diese unterschiedlichen Sphären auf das Verhalten der Energiekonsumenten haben. Die Theorie des geplanten Verhaltens als Grundlage des Technology Acceptance Model von Davis bildet dabei das psychologische Fundament der Forschung. Wenn man annimmt, dass Entscheidungen rational getroffen werden und dafür logische Wirkungszusammenhänge ausschlaggebend sind, kann Verhalten messbar dargestellt werden. Das Technology Acceptance Model wiederum dient als Werkzeug, um die Forschungsfrage nach der Trennung von menschlichen und technischen Einflüssen auf das Verhalten zu evaluieren. Ausgehend von der gewählten Theorie und dem (Verhaltens-)Modell ergaben sich bestimmte Anforderungen an das Design der Fragebögen.

Der Fragebogen ist dementsprechend in zwei Themenblöcke gegliedert: Im ersten Block wird abgefragt, welche Einflussmöglichkeiten die Bewohner/innen auf ihre Heizung, die Lüftung und die Fenster haben. Außerdem wird erfasst, wie die einzelnen Bewohner/innen heizen und lüften: welche Raumtemperatur sie wählen, wie häufig sie diese ändern und wie häufig die Fenster geöffnet werden. Des Weiteren werden mögliche Zusammenhänge der genannten einzelnen Faktoren überprüft. Dieser Block wurde so gestaltet, dass das entwickelte Technology Acceptance Model im Einklang mit der Theorie des geplanten Verhaltens analysiert werden konnte. Im zweiten Block werden Fragen zu konkreten Wohnverhältnissen und demografischen Merkmalen der Bewohnerschaft gestellt, die als Kontrollgrößen für spätere Analysen wichtig sind.

Mithilfe des Technology Acceptance Model wird die Akzeptanz des Heizungssystems ermittelt, indem einerseits die wahrgenommene thermische Behaglichkeit und andererseits die wahrgenommene Bedienbarkeit der Heizungsanlage unterschieden werden. Diese beiden Variablen beeinflussen die Akzeptanz des Heizsystems in diesem Modell nicht nur direkt,

**Abb. 5-3:** Entwickeltes Technology Acceptance Model zur Unterscheidung von menschlichen und technischen Einflüssen



sondern auch durch die Mediator-Variable des wahrgenommenen Nutzens. Das zu analysierende Modell ist in Abbildung 5-3 grafisch dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse aus der Analyse des Technology Acceptance Model können bei Heesen und Madlener (2014) nachgelesen werden. Bedeutsam ist die Hauptaussage der Analyse, dass die thermische Behaglichkeit der Wohnräume und die Bedienbarkeit von Heizungs- und Lüftungssystem im Hinblick auf die Akzeptanz der Technologie als gleich relevant wahrgenommen wurden. Das bedeutet, dass die Bewohner/innen beide Variablen als gleich einflussreich bewerten, wenn es darum geht, sich eine Meinung zu den eingesetzten Technologien zu bilden. Daneben hat die Mediator-Variable des wahrgenommenen Nutzens die stärkste Wirkung auf die wahrgenommene Akzeptanz. Diese Wirkung übersteigt die der bereits genannten einzelnen Einflusskomponenten, was nichts anderes bedeutet, als dass eine Einflussnahme auf Bewohner/innen am ehesten über den wahrgenommenen Nutzen erfolgen kann und nicht über die spezifischen Einflüsse. Die nachfolgenden Analysen beziehen sich detaillierter auf einzelne Einflussfaktoren und stehen in engem Verhältnis zu den bereits präsentierten Analysen.

### 5.3 Ergebnisse der quantitativen Befragung per Fragebogen

Im November 2013 wurde die Bewohnerschaft der Riegel 2 und 3 befragt. Die Bewohner/innen des Riegels 1 wurden ein Jahr später interviewt, im November 2014. Alle Interviews wurden persönlich in den Wohnungen der Befragten durchgeführt. Konkret wurden das Lüftungs- und Heizverhalten, die Einstellung zur Interaktion mit dem Heizungssystem und eine persönliche Einschätzung der tatsächlichen Nutzung abgefragt. Um zu erfassen, inwieweit sie sich energiesparend verhalten, wurden die Interviewten aufgefordert einzuschätzen, welche Konsequenzen energiesparendes Lüftungs- und Heizverhalten hat und wie sie dieses bewerten. Dabei gaben die Befragten beispielsweise an, wie wichtig es ihnen ist, die Belas-

tung der Umwelt durch energiesparendes Lüften zu verringern. Zusätzlich wurde gefragt, wie stark der Einfluss des Umfelds auf das energiesparende Verhalten der Bewohner/innen ist. Weil aus dem Monitoring detaillierte Messdaten aus allen Wohnungen vorliegen, können Absichten und Bewertungen direkt mit dem tatsächlichen Verhalten der Bewohner/innen verglichen werden.

### 5.3.1 Einflussfaktoren auf das Heizverhalten nach Alter und Geschlecht

Für den Energieverbrauch sind demografische Faktoren bedeutsam. Deshalb wurden die Antworten auf den Fragebögen unter Berücksichtigung dieser Kriterien ausgewertet. In der Literatur werden verschiedentlich alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede im Energieverbrauchsverhalten sowie im Umweltbewusstsein festgestellt (Brounen et al. 2012; Bittermann & Gollner 2011; Noll et al. 2008). Ob sich diese tatsächlich bestätigen lassen, wurde auch durch den hier beschriebenen Fragebogen überprüft. Die befragten Bewohner/innen wurden für die Auswertung jeweils in zwei Gruppen eingeteilt, einerseits differenziert nach dem Alter und andererseits differenziert nach dem Geschlecht. Zunächst wird auf den demografischen Faktor Alter eingegangen. Differenziert nach unter 65-Jährigen und über 65-Jährigen wurden die Antworten ausgewertet, wobei sich durch diese Trennung zwei fast gleich umfangreiche Stichproben ergeben. In dieser Analyse wird nicht auf alle Fragen des Fragebogens eingegangen, sondern jeweils nur auf diejenigen, die im betrachteten Zusammenhang die signifikantesten Unterschiede aufgezeigt haben.

Untersuchungen zufolge haben ältere Personen einen höheren Energieverbrauch als jüngere (Brounen et al. 2012). Diese These kann auch durch die vorliegenden Messdaten bestätigt werden. So hat die Gruppe der über 65-Jährigen im Betrachtungszeitraum einen um durchschnittlich 21 % höheren Heizwärmeverbrauch als die Gruppe der unter 65-Jährigen (siehe Tabelle 5-1). Dies liegt der Literatur zufolge an einem erhöhten Komfortbedürfnis älterer Bewohner/innen (Brounen et al. 2013). In den Messdaten wird auch ersichtlich, dass in den Wohnungen älterer Bewohner/innen im Vergleich zu den jüngeren eine etwas höhere durchschnittliche Raumtemperatur herrscht. Dieser Temperaturunterschied ist jedoch zu gering, um als signifikant bewertet zu werden. In den Antworten auf die Frage, wie warme bzw. kalte Temperaturen empfunden werden, lassen sich ebenfalls keine größeren Unterschiede zwischen den beiden Gruppen feststellen.

Das Heizenergie-Konsum-Modell liefert an dieser Stelle bereits eine Klassifizierung der Beobachtungen aus dem Projekt. Anhand der Durchschnittstemperaturen aus Tabelle 7-1 wird ersichtlich, dass die betrachtete Umgebung ein Temperaturniveau (Nutzenniveau) liefert, das sehr nahe am optimalen Niveau von ca. 23 °C liegt (ISO 7730).

**Tabelle 5-1:** Unterschiede im Heizwärmeverbrauch  $q_h$  im Jahr 2013 und der durchschnittlichen Temperatur, differenziert nach Alter

|            | Unter 65           |              | Über 65            |              |
|------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
|            | $q_h$ in kWh/(m²a) | Ø Temp in °C | $q_h$ in kWh/(m²a) | Ø Temp in °C |
| Max        | 65,10              | 24,17        | 79,28              | 24,25        |
| Min        | 0,30               | 19,66        | 0,01               | 20,48        |
| Mittelwert | 20,31              | 21,83        | 25,78              | 22,27        |

Größere Differenzen zeigen sich in der Art, wie geheizt wird. Die Daten sind in den folgenden Box-Plots grafisch aufbereitet. Dabei sind jeweils die mittleren beiden Quantile, die also 50 % der Antworten repräsentieren, durch eine Box dargestellt (gelbe Kästchen). Da im Fragebogen eine 7-Punkte-Likert-Skala verwendet wurde, laufen alle Dimensionen über die Werte 0 bis einschließlich 6. Der/die Befragte hat sieben Antwortmöglichkeiten von „sehr negativ“ bis „sehr positiv“. Je größer ein Box-Plot, desto breiter ist die Streuung der Daten bzw. Antworten im vorgegebenen 7-Punkte-Spektrum. Nach einem ersten Abgleich der beiden Gruppen anhand der Messdaten sollen im Folgenden die Ergebnisse der Fragebögen ausgewertet werden.

Abb. 5-4 lässt sich entnehmen, dass ältere Bewohner/innen eher darauf bedacht sind, die Temperaturen in der Wohnung konstant zu halten. Abb. 5-5 macht deutlich, dass jüngere Bewohner/innen tendenziell nur den genutzten Raum heizen. Die Antworten auf diese beiden Fragen legen nahe, dass bei älteren Bewohnern/innen eine geringere Variation der Temperaturen in den Räumen vorliegt (da diese in der Regel öfter zu Hause sind und ein stetigeres

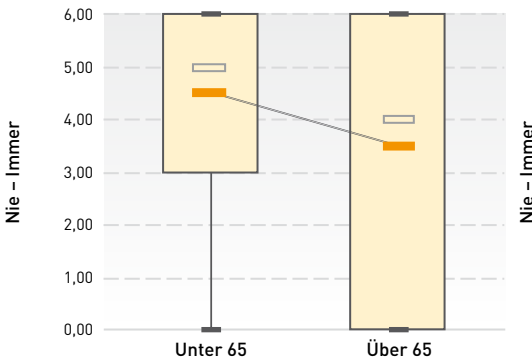
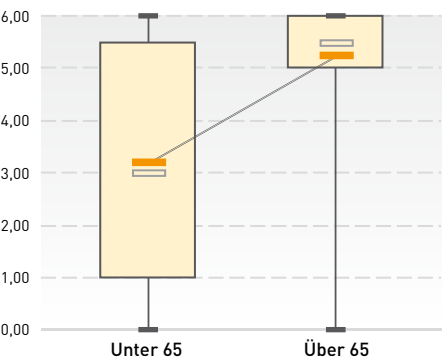
„Wir lassen die Temperaturen in der Wohnung konstant, anstatt die Heizung häufig an- und auszuschalten.“

„Wir heizen jeweils nur den genutzten Raum.“

**Abb. 5-4 (links):** Konstantes Heizen, Auswertung nach Alter

**Abb. 5-5 (rechts):** Beheizte Räume, Auswertung nach Alter

- Maximum
- Minimum
- Median
- Mittelwert

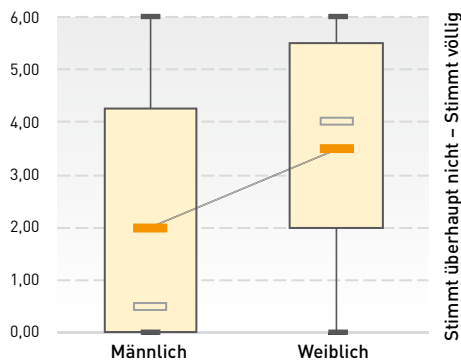


Leben führen). In den Messdaten zeigen sich tatsächlich deutlich stärkere Veränderungen des durchschnittlichen Temperaturniveaus bei jüngeren Bewohnern/innen.

Neben den altersspezifischen Unterschieden lässt sich auch eine Reihe von geschlechtsspezifischen Besonderheiten feststellen. Hierzu sind in der Literatur diverse Aussagen zu finden, z. B. dass bei Frauen das Umweltbewusstsein stärker ausgeprägt ist als bei Männern (Noll et al. 2008) und dass Frauen temperaturempfindlicher sind. In den Antworten zeigen sich diesbezüglich allerdings keine nennenswerten Unterschiede. Signifikante Unterschiede sind jedoch an anderer Stelle zu beobachten: Frauen und Männer unterscheiden sich deutlich in ihrer Motivation, sich mit dem Heizsystem zu beschäftigen. Außerdem beurteilen sie ihre Fähigkeit anders, wenn es darum geht, die Heizung wunschgemäß zu steuern. Diese Unterschiede wurden in der Literatur nach unserer Kenntnis bisher noch nicht beschrieben. Während der qualitativen Interviews ist in diesem Forschungsprojekt bereits aufgefallen, dass einzelne Bewohner/innen Schwierigkeiten mit der Bedienung der Anlagentechnik haben. Die Ergebnisse des Fragebogens zeigen, dass Frauen mit der wahrgenommenen Bedienung der Anlagentechnik nicht zufrieden sind bzw. diese als nicht intuitiv genug wahrnehmen. Bei diesen Ergebnissen gilt es zu beachten, dass die Gruppe der Frauen (mit N = 20) deutlich größer als die Gruppe der Männer (mit N = 11) ist.

Abb. 5-6 zeigt, dass weibliche Bewohnerinnen die Interaktion mit dem Heizungssystem häufiger als demotivierend bewerten als die befragten männlichen Bewohner. Abb. 5-7 zeigt, dass die Bewohnerinnen eher der Ansicht sind, dass sich das Heizsystem unerwartet verhält. Männer fühlen sich außerdem sicherer, das Heizungssystem nach den eigenen Vorstellungen und Wünschen regeln zu können, wie Abb. 5-8 (Seite 54) zu entnehmen ist.

„Die Interaktion mit dem Heizsystem ist häufig demotivierend.“



„Das Heizsystem verhält sich häufig unerwartet“

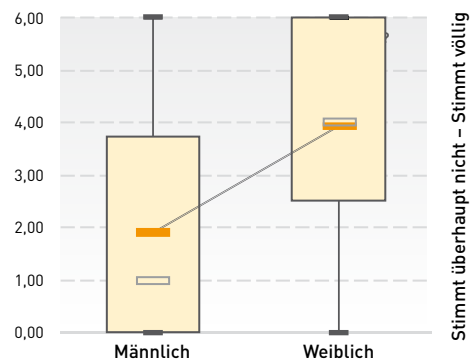


Abb. 5-6 (links): Bedienung der Heizung, Auswertung nach Geschlecht

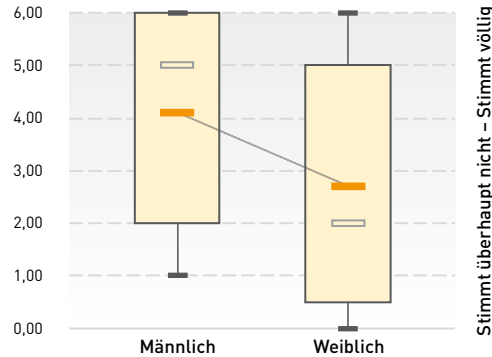
Abb. 5-7 (rechts): Funktionsweise Heizsystem, Auswertung nach Geschlecht

— Maximum  
— Minimum  
— Median  
— Mittelwert

„Es fällt mir leicht, meine Wünsche oder Bedürfnisse (die Behaglichkeit betreffend) in der Bedienung des Heizsystems umzusetzen.“

**Abb. 5-8:** Wunschgemäße Steuerung, Auswertung nach Geschlecht

- Maximum
- Minimum
- Median
- Mittelwert



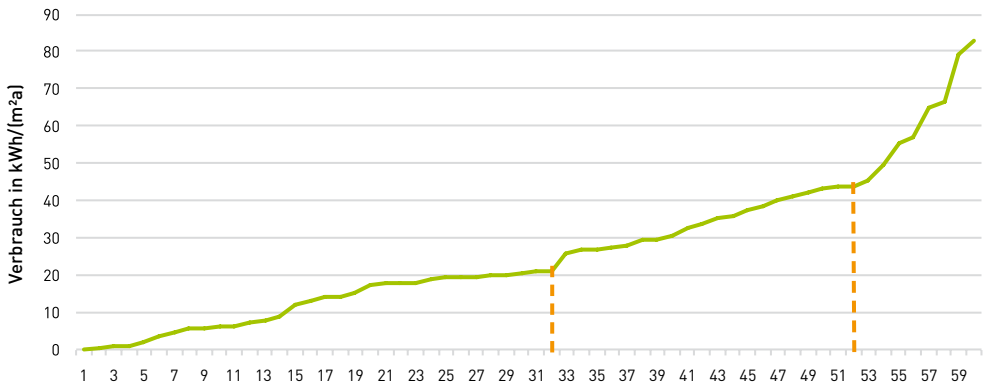
Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die vorhandenen Daten die in der Literatur gefundenen Ergebnisse und Tendenzen bezüglich möglicher Einflüsse demografischer Merkmale bestätigen. Allgemeingültige Rückschlüsse sind daraus allerdings nicht zu ziehen, da die Stichprobe (N=31) klein ist. Nichtsdestotrotz geben die gefundenen Ergebnisse wichtige Hinweise zur weiteren Auswertung der Fragebögen.

### 5.3.2 Verbrauchsdatenanalyse

Innerhalb der sanierten Wohngebäude zeigen sich signifikante Unterschiede beim Energieverbrauch der einzelnen Wohnungen. Ob sich diese Unterschiede auch in den Fragebogendaten widerspiegeln, soll in diesem Abschnitt überprüft werden. Dazu werden die Heizenergieverbräuche  $q_h$  des Jahres 2013 betrachtet. Die Wohnungen werden hierbei in drei Gruppen klassifiziert, welche sich aus den unterschiedlichen Steigungen der nach Größe geordneten Verbrauchsdaten ergeben. So kann zwischen niedrigem, mittlerem und hohem Energieverbrauch unterschieden werden. Diese Einteilung ist zunächst rein subjektiv, birgt aber an sich schon Einblicke in die Problematik. Insbesondere der exponentielle Anstieg in der Gruppe mit hohem Energieverbräuchen erfordert eine weitergehende Analyse. Abb. 5-9 ist der Energieverbrauch der Wohnungen zu entnehmen, die orange gestrichelten Linien geben die Einteilung (Klassifizierung) wieder.

In der beschriebenen Weise zusammengefasst ergeben sich die in Tab. 5-2 gezeigten Daten bezüglich der einzelnen Gruppen. Der Anteil klassifizierter Wohnungen bezieht sich auf alle

Staffelung der Wohnungen nach Verbrauch



**Abb. 5-9:** Klassifizierung der Wohnungen  
— Verbrauch einzeln (Messdaten)  
- - - Klassengrenzen kongruent zu Tabelle 5-2

| Verbrauch                                 | Klassifizierte Wohnungen | Beantwortete Fragebögen | Gesamtenergieverbrauch in % |
|-------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Niedriger Verbr.<br>[≤ 24,9 kWh/(m²a)]    | 53,33 %<br>[32/60]       | 65 %<br>[21/32]         | 24,09 %<br>[378,5/1.570,8]  |
| Mittlerer Verbr.<br>[25 - 44,9 kWh/(m²a)] | 33,34 %<br>[20/60]       | 35 %<br>[7/20]          | 43,99 %<br>[691/1.570,8]    |
| Hoher Verbr.<br>[≥ 45 kWh/(m²a)]          | 13,33 %<br>[8/60]        | 7 %<br>[3/8]            | 31,9 %<br>[501,3/1.570,8]   |

**Tabelle 5-2:** Klassifizierung der Wohnungen nach Verbrauch

gemessenen Wohnungen, während der Anteil beantworteter Fragebögen eine Rücklaufquote innerhalb der jeweiligen Gruppe angibt. Die letzte Spalte zeigt den Anteil der jeweiligen Gruppe am Gesamtenergieverbrauch.

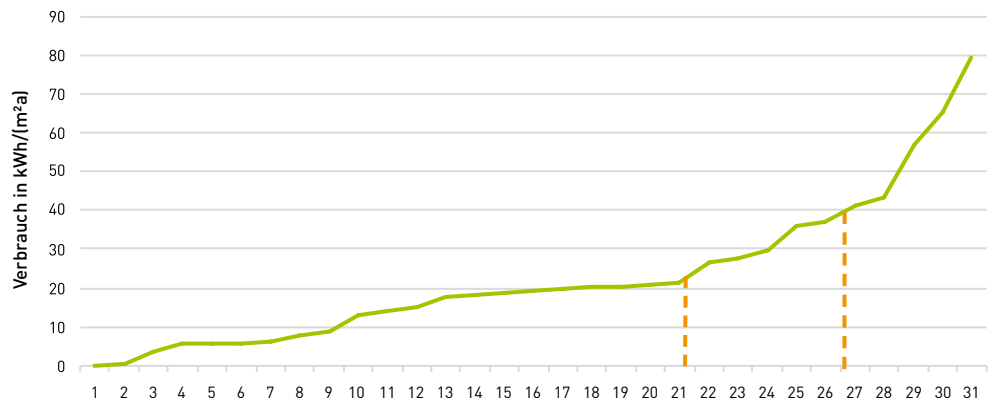
Eine andere, für die folgenden Auswertungen aussagekräftigere Klassifizierung ergibt sich, wenn nur diejenigen Wohnungen berücksichtigt werden, deren Bewohner/innen tatsächlich befragt wurden. Abb. 5-10 bildet – der Logik aus Abb. 5-9 folgend – die Klassifizierung der befragten Wohnungen ab. Einer visuellen Analyse lässt sich entnehmen, dass die befragte Stichprobe gut mit dem allgemeinen, in Abb. 5-9 dargestellten Energieverbrauchsverhalten übereinstimmt. Der Kurvenverlauf ändert sich nicht wesentlich. Die identifizierten Klassengrenzen sind jedoch niedriger als in der Klassifizierung aller Wohnungen.



### Staffelung der Wohnungen nach Verbrauch

**Abb. 5-10:** Klassifizierung der befragten Wohnungen

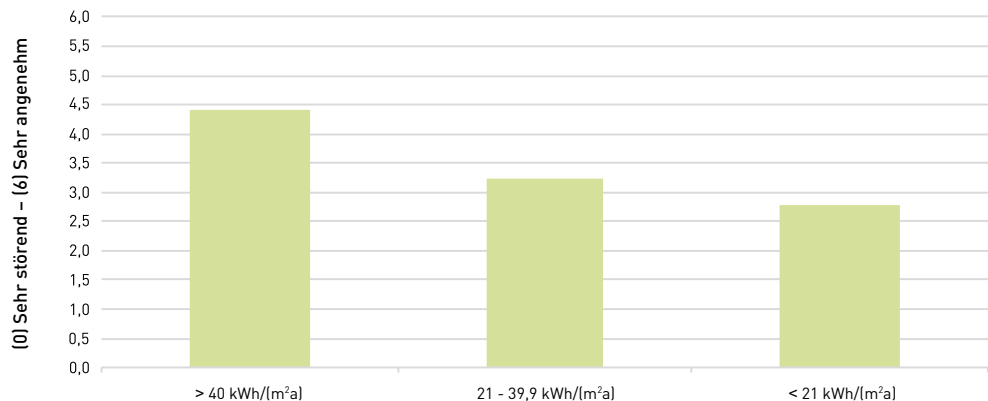
- Verbrauch einzeln (Fragebögen)
- - - Klassengrenzen



Nach dieser Klassifizierung ergeben sich drei Verbrauchsklassen: Verbrauch kleiner als 20,9 kWh/(m²a), Verbrauch zwischen 21 kWh/m²a und 39,9 kWh/(m²a) sowie Verbrauch größer als 40 kWh/(m²a). Für die folgende Auswertung wurden die Antworten aus den Fragebögen nach diesen Klassen aufgeteilt. Wie oben werden davon nur diejenigen Fragen vorgestellt, bei denen sich charakteristische Unterschiede zwischen den drei Verbrauchsklassen gezeigt haben.

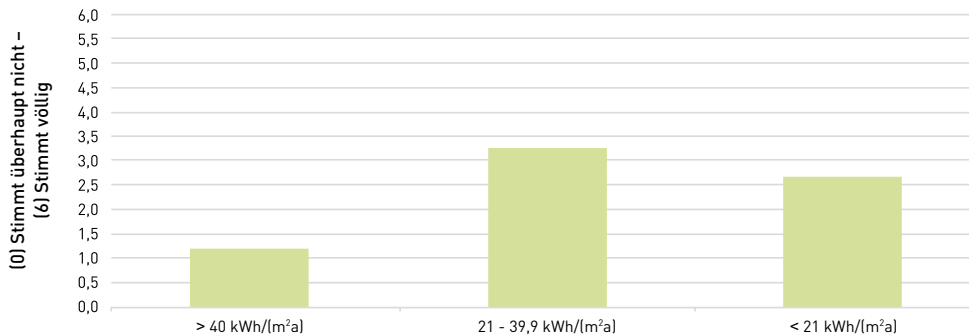
### „Hohe Temperaturen empfinde ich als ...“

**Abb. 5-11:** Hohe Temperaturen, Auswertung nach Verbrauchsgruppen



Den Einstieg in diese Analyse liefert eine Frage, die als Kontrollfrage bewertet werden kann. Dass Bewohner/innen mit einer durchschnittlich höheren Raumtemperatur auch einen höheren Heizenergieverbrauch verursachen, wird in Kapitel 6.2 gezeigt. Es kann vermutet werden, dass diese Personen höhere Temperaturen auch als angenehmer empfinden. Abb. 5-11 zeigt, dass mit steigendem Energieverbrauch auch die Vorliebe für höhere Temperaturen wächst. Diese Frage zur generellen Einstellung bezüglich des thermischen Komforts der Bewohner/innen zeigt, dass die Antworten plausible Wirkungszusammenhänge beschreiben. Im Folgenden werden Fragen betrachtet, bei denen es primär um den Nutzen oder die Funktionalität des neuen Heizungssystems geht.

**„Durch das neue Heizsystem sparen wir Geld.“**



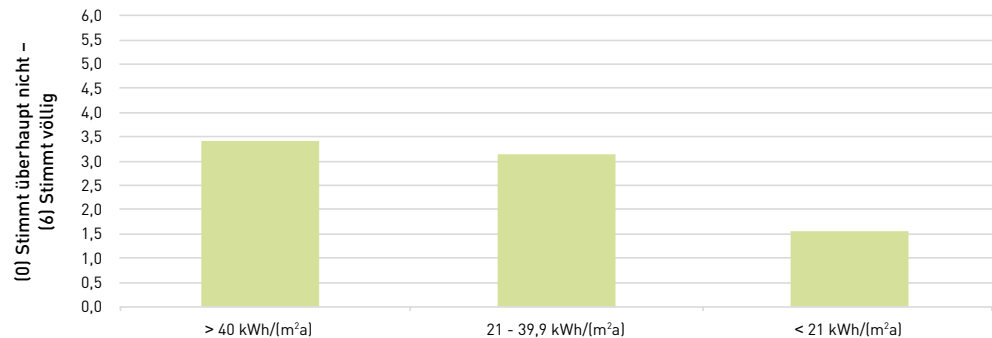
**Abb. 5-12:** Heizsystem spart, Auswertung nach Verbrauchsgruppen

Im bereits in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten Technology Acceptance Model führt, vereinfacht gesprochen, ein wahrgenommener Nutzen zu einer Einstellung zur Nutzung, was letztendlich zum tatsächlichen Nutzungsverhalten führt. An dieser Stelle liegt der Fokus darauf, die Einstellung der Bewohner/innen zu ihrem aktuellen Heizsystem im Vergleich zu ihrem früheren Heizsystem zu bewerten. Hierbei ist ein möglicher (subjektiv wahrgenommener) Nutzen ein monetärer Vorteil, der sich daraus ergibt, die effizientere Heizungsanlage einzusetzen. Wenn diese Anlage genutzt wird, verbraucht sie naturgemäß Energie. Diese Konsequenz steht nun in direktem Zusammenhang mit dem wahrgenommenen monetären Nutzen der Anlage: Je mehr Energie verbraucht wird, desto mehr Geld wird zwar theoretisch gespart, in der Praxis aber auch ausgegeben. Es ist daher davon auszugehen, dass der Grad der Nutzung und die Einstellung dazu sich direkt beeinflussen. Der Heizenergieverbrauch wirkt sich also auf den wahrgenommenen Nutzen des Heizsystems aus. Abb. 5-13 zeigt dementsprechend, dass Bewohner/innen mit hohem Heizenergieverbrauch eher nicht glauben, dass sie durch das neue Heizsystem Geld sparen. Auffällig ist allerdings, dass der wahrgenommene monetäre Nutzen in allen Gruppen eher gering ausgeprägt ist. Dies kann an den gestiegenen Kaltmieten

als Ergebnis der Sanierungen liegen. Wie in der theoretischen Herleitung zum Heizenergie-Konsum-Modell bereits kurz beschrieben, haben Hastings und Shapiro (2013) gezeigt, dass Konsumenten (bzw. bei uns Wohnungsinhaber) Budgets für verschiedene Ausgabengruppen bereitstellen. Die Miete und die Nebenkosten werden als Ausgabengruppe eher als Ganzes wahrgenommen. Dies kann zu dem hier präsentierten Ergebnis führen.

**„Ich finde die Nutzung des Heizsystems lästig.“**

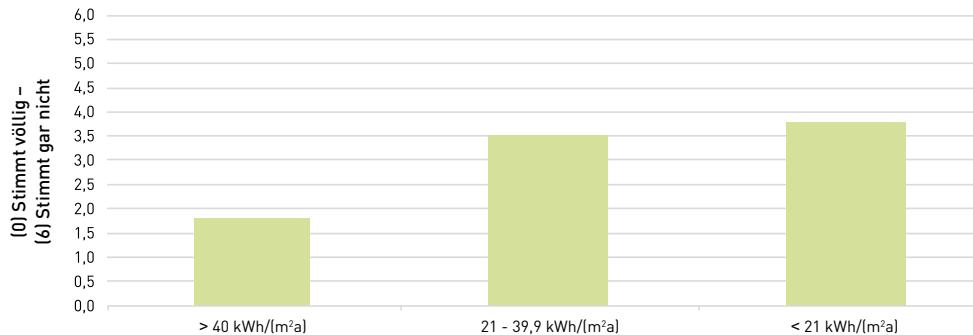
**Abb. 5-13:** Heizsystem lästig, Auswertung nach Verbrauchsgruppen



Ein Hauptaugenmerk des vorgestellten Technology Acceptance Model liegt auf der wahrgenommenen Bedienbarkeit, welche ebenfalls über eine subjektive Einstellung die Nutzung beeinflusst. Bewohner/innen mit einem hohen Verbrauch von Heizenergie empfinden das Heizsystem eher als lästig als die Bewohnern/innen, die weniger verbrauchen. Die wahrgenommene Bedienbarkeit hat also über die Einstellung auch einen zu erwartenden Einfluss auf die Nutzung und damit auch den Verbrauch. Diese Relation kann in den erhobenen Daten nachgewiesen werden (vgl. Abb. 5-13).

Menschen tendieren dazu, sich Meinungen aus Vergleichen zu bilden. Eine Frage zielt daher auf einen Vergleich der wahrgenommenen Bedienbarkeit der neuen Heizanlage gegenüber einem (undefinierten) alten bzw. bisherigen Heizsystem ab. Die ausgewerteten Antworten unterstützen die Annahme, dass die wahrgenommene Bedienbarkeit die Einstellung zur Nutzung beeinflusst. Bewohner/innen mit einem hohen Verbrauch sind mit dem neuen Heizungssystem deutlich unzufriedener als diejenigen mit niedrigem Verbrauch (vgl. Abb. 5-14). Die Antworten auf diese Frage legen den Schluss nahe, dass Bewohner/innen mit höherem Heizenergieverbrauch eine einfache Bedienung der Heizanlage bevorzugen, wie sie vor der Sanierung gegeben war. Die Bestandswohnungen waren mit einfachen Technologien ausgestattet gewesen, und die meisten der befragten Bewohner/innen hatten zu dieser Zeit bereits in der Siedlung gelebt. Dies wurde bereits in den qualitativen Interviews thematisiert (vgl. Abschnitt 5.2.1).

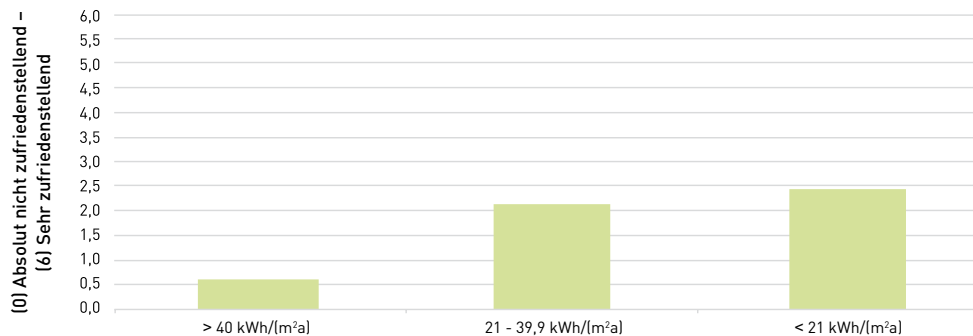
„Wenn ich alles berücksichtige, bin ich der Ansicht, dass die Nutzung vorheriger Heizsysteme besser war.“



**Abb. 5-14:** Heizsystem vorher besser, Auswertung nach Verbrauchsgruppen

Wie bei der Analyse nach demografischen Merkmalen ergibt sich auch beim Vergleich der Verbrauchsgruppen ein bereits vor der Analyse erwartetes Bild. Dies ist nicht ungewöhnlich, aber aufschlussreich, bestätigt die empirische Forschung doch die Intuition. So kann weiter davon ausgegangen werden, dass die Befragten nicht irgendwelche ungewöhnlichen oder von den bisherigen Erkenntnissen abweichenden Einstellungen zeigen. Vielmehr leitet sich daraus die Erkenntnis ab, dass der Datensatz auch für weitergehende, komplexere Analysen durchaus geeignet sein kann. Außerdem können durch diese Ergebnisse die intuitiv unterstellten sowie bereits in der Literatur gefundenen Wirkungszusammenhänge bestätigt werden.

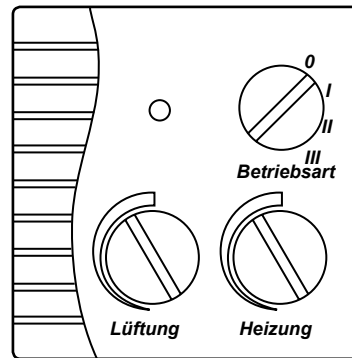
„Wenn Ihre Wohnung eine Lüftungsanlage hat, wie würden Sie insgesamt deren Wirkung beschreiben?“



**Abb. 5-15:** Wirkung Lüftungsanlage, Auswertung nach Verbrauchsgruppen

Eine besondere technische Komponente stellen die in einigen der Wohnungen installierten Lüftungsanlagen dar. Wie in den qualitativen Interviews festgestellt, ist deren Akzeptanz generell sehr gering. Abb. 5-15 verdeutlicht die Einstellung bzw. das Empfinden der Wirksamkeit der verbauten Lüftungsanlage. Es zeigt sich der Trend, dass Bewohner/innen von Wohnungen mit niedrigem Energieverbrauch die Lüftungsanlage als „wirkungsvoller“ beschreiben als jene von Wohnungen mit höherem Heizenergieverbrauch. Die Nutzung der Lüftungsanlage, welche mit Wärmerückgewinnungstechnologie ausgestattet ist, führt im Gegensatz zur Fensternutzung zu einem deutlich geringeren Heizenergieverbrauch (vgl. die Energiekennzahlen in Abschnitt 6.1). Diejenigen Bewohner/innen, die die Verwendung der Lüftungsanlage als wirkungsvoller betrachten, werden diese auch eher einsetzen. Bei der Akzeptanz von fortschrittlichen Lüftungstechnologien besteht aus unserer Sicht weiterer Forschungs- bzw. Inventionsbedarf, um die vorhandenen technischen Potenziale dieser Technologie letztlich in der Praxis voll ausschöpfen zu können. Als Beispiel wird an dieser Stelle die Bedieneinheit einer Luftheizung präsentiert (siehe Abb. 5-16), wobei insbesondere die Betriebsarten nicht selbsterklärend sind. Außerdem müssen sowohl Heizung als auch Lüftung parallel richtig eingestellt werden, um den gewünschten Komfort zu erreichen.

**Abb. 5-16:** Bedieneinheit einer Luftheizung



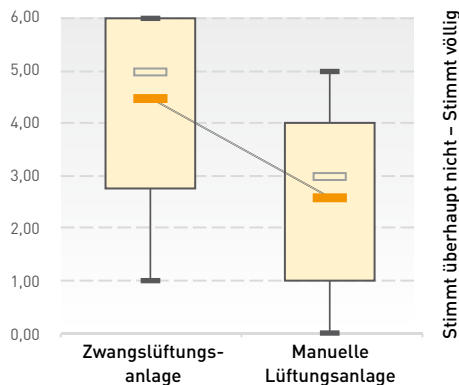
Die Auswertung zeigt, dass die Bewohner/innen mit der neu eingebauten Technik generell nicht vollständig zufrieden sind. Der Trend in den Antworten ist hier eindeutig an den Verbrauch zu koppeln, was wiederum die ökonomische Dimension des Problems in den Fokus rücken lässt, denn grundsätzlich wäre es den Bewohnern/innen möglich, die Arbeitsweise der Anlage anhand der Heizkostenabrechnungen zu beurteilen. In den Wohnungen der Befragten kam es zusätzlich vereinzelt zu technischen Problemen, die das Akzeptanzniveau weiter gesenkt haben können (vgl. Abschnitt 6.4).

### 5.3.3 Betrachtung des Fenster-Lüftungsverhaltens

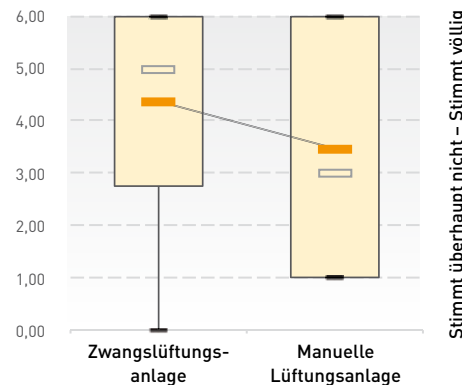
Aus den Ergebnissen von Kapitel 6 und den technischen Grundzusammenhängen ergibt sich die Notwendigkeit, das Lüftungsverhalten der Bewohner/innen auch im Fragebogen fokussiert auszuwerten. Von Interesse ist dabei, ob die installierte Lüftungsanlage oder bevorzugt die Fenster verwendet werden. Aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Auswertungen werden hier signifikante Einsparpotenziale vermutet. In zwei Eingängen von Riegel 2 und 3 wurden Zwangsbelüftungselemente im Fensterrahmen installiert, wohingegen in den restlichen Wohnungen dieser Gebäude manuell einstellbare maschinelle Lüftungsanlagen verbaut sind (siehe Kapitel 3). Die Daten werden daher zur Auswertung entsprechend der jeweiligen technischen Ausstattung in zwei Gruppen eingeteilt und auf dieser Basis mögliche Gründe für ein unterschiedliches Lüftungsverhalten evaluiert. Es zeigt sich: Häufig durch Öffnen der Fenster zu lüften, wird von den Bewohnern/innen einer Wohnung mit Zwangsbelüftung als komfortabler wahrgenommen als von denjenigen, die über eine maschinelle Lüftungsanlage verfügen. Die befragten Bewohner/innen geben an, dass sich die Luftqualität mit einer Zwangslüftung – gegenüber einer maschinellen Lüftungsanlage – (gefühl) besser regulieren lässt.

**Durch ein häufiges Öffnen des Fensters können wir die Temperatur absenken.**

**Durch ein häufiges Öffnen des Fensters müssen wir keine unangenehme Luftqualität ertragen.**



Stimmt überhaupt nicht – Stimmt völlig



Stimmt überhaupt nicht – Stimmt völlig

**Abb. 5-17 (links):** Temperatur absenken, Auswertung nach Lüftungsanlage

**Abb. 5-18 (rechts):** Luftqualität ertragen, Auswertung nach Lüftungsanlage

Tabelle 5-3 zeigt, dass die Bewohner/innen einer Wohnung mit maschinell einstellbarer Lüftungsanlage häufiger die Fenster öffnen, um zu lüften. Diese Ergebnisse sind nicht kongruent zu den Ergebnissen der Fragebögen. Wie oben gezeigt, sind Bewohner/innen mit einer Zwangsbelüftung stärker der Meinung, dass durch manuelles Öffnen des Fensters das Raumklima

beeinflusst werden kann. Die Diskrepanz zwischen dem beobachteten Verhalten und dem wahrgenommenen Nutzen zeigt: Bewohner/innen von Wohnungen mit maschinell einstellbarer Lüftungsanlage sind weniger der Ansicht, dass sie mit dem System die gewünschten Ergebnisse bezüglich des thermischen Komforts tatsächlich umsetzen können. Diese Diskrepanz könnte dazu führen, dass letztlich häufiger die Fenster geöffnet werden, so wie es beobachtet wurde.

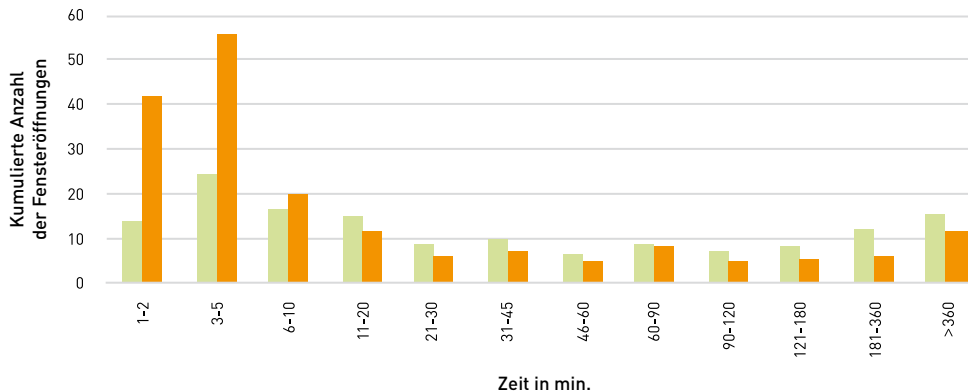
**Tabelle 5-3:** Lüftungsverhalten, Mittelwerte und Standardabweichungen

| Monat                                        | Mittelwert<br>der Zeit der Fenster-<br>öffnung in Min. | Standardabweichung<br>der Zeit der Fenster-<br>öffnung in Min. |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Oktober, Zwangsbelüftung                     | 144,4                                                  | 93,2                                                           |
| Oktober, maschinell einstellbare<br>Lüftung  | 217,7                                                  | 181,8                                                          |
| November, Zwangsbelüftung                    | 133,6                                                  | 98,0                                                           |
| November, maschinell einstellbare<br>Lüftung | 200,2                                                  | 177,5                                                          |
| Dezember, Zwangsbelüftung                    | 136,7                                                  | 108,6                                                          |
| Dezember, maschinell einstellbare<br>Lüftung | 208,6                                                  | 177,7                                                          |

Tabelle 5-3 zeigt, dass innerhalb der Gruppen große Unterschiede darin bestehen, wie häufig und lange mithilfe der Fenster gelüftet wird. Es besteht eine klare Tendenz, dass die Besitzer maschinell einstellbarer Lüftungsanlagen dazu neigen, häufiger die Fenster zu öffnen. Um diese Erkenntnisse genauer zu evaluieren, wird in Abb. 5-19 auf der x-Achse nach der Dauer der Fensteröffnungen unterschieden. Diese Einteilung ist sinnvoll, da die Messtechnik nur protokolliert, ob ein Fenster auf oder zu ist. Von der Seite der Technik her bleibt daher offen, ob das Fenster komplett geöffnet ist oder „auf Kipp“ gestellt wurde. Eine kurze Fensteröffnung weist daher intuitiv eher auf ein komplettes Öffnen des Fensters hin als eine längere Öffnungsdauer (zumindest im Winter sollte diese Relation gelten). Die y-Achse zeigt die kumulierte Zeit in Minuten, in der die Fenster in den jeweiligen Wohnungen der Klasse geöffnet sind.

Es zeigt sich, dass die Besitzer/innen maschinell einstellbarer Lüftungsanlagen deutlich häufiger kurze Fensteröffnungszeiten (weniger als 6 Minuten) in der Zeit von einschließlich Oktober bis Dezember 2013 aufweisen als die Bewohner/innen mit einer Zwangsbelüftung. Bei längeren Fensteröffnungszeiten kehrt sich dieses Bild um. Das lässt vermuten, dass die Bewohner/innen mit maschinell einstellbarer Lüftungsanlage mehr noch als die Bewohner/innen mit interaktionsfreier Zwangsbelüftung die Fenster als zusätzliche Ventilationsquellen

### Histogramm: Vergleich des Verhaltens der Fensteröffnung



**Abb. 5-19:** Lüftungsverhalten der befragten Bewohner/innen  
 ■ Zwangslüftung  
 ■ Maschinell einstellbare Lüftung

nutzen. In der Gruppe mit maschinell einstellbarer Lüftungsanlage gaben mehr Haushalte an, Probleme mit der Lüftungsanlage zu haben, als in der Gruppe mit Zwangsbelüftung. Werden diese aus dem Vergleich ausgeschlossen, lüftet die Gruppe mit maschinell einstellbarer Lüftungsanlage in allen betrachteten Zeiträumen und allen betrachteten Zeitintervallen häufiger. Da die Gruppe der Befragten dann ziemlich klein ist (zwei Wohnungen), kann nicht von statistischer Signifikanz ausgegangen werden. Ein übereinstimmendes Meinungsbild findet sich dennoch in der Gruppe der manuell einstellbaren Lüftungsanlagen. Beide Wohnungen gaben auf die Frage nach der Wirkung der Lüftungsanlage an, diese sei nicht zufriedenstellend.

Dieser Abgleich zeigt den Unterschied dazwischen, wie Bewohner/innen die Auswirkungen ihres Fensteröffnungsverhalten einschätzen und wie sie diese tatsächlich betätigen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Variablen ist markant und allem Anschein nach so bisher in der Literatur noch nicht beschrieben worden. Eine ausführlichere Auswertung dieser Beobachtung ist Bestandteil der weiteren Forschung.

## 5.4 Empfehlungen zum Bewohnerverhalten: Maßnahmen zur Minimierung des Rebound-Effekts

Dieser Abschnitt widmet sich aufbauend auf den Befragungsergebnissen der Frage, wie man erreichen kann, dass die Bewohner/innen nach einer Sanierung mit der neuen Anlagentechnik sinnvoller und somit plangemäß umgehen. Zu diesem Zweck werden die Maßnahmen eingeteilt in Maßnahmen vor und nach der Sanierung sowie übergreifende Maßnahmen. Das Doppelziel für diese Maßnahmen besteht darin, bei minimalem Energieverbrauch den gewünschten Wohnkomfort zu erreichen.



### 5.4.1 Übergreifende Maßnahmen

Diese Maßnahmen sind übergreifend in Bezug auf die verschiedenen Phasen eines umfangreichen Sanierungsprojekts: Planung, Umsetzung und Betrieb. Von zentraler Bedeutung ist dabei insbesondere eine kontinuierliche Kommunikation: Alle Beteiligten, auch die Bewohner/innen, werden laufend informiert und erhalten Möglichkeiten, sich einzubringen. So können die Bewohner/innen frühzeitig und im gesamten Sanierungsprozess Fragen stellen und Probleme mitteilen, die dann im weiteren Sanierungsprozess aufgegriffen und zeitnah gelöst werden können. Wenn die Bewohner/innen auf diesem Wege frühzeitig über die geplanten energieeffizienten Technologien informiert werden, könnte das deren spätere Akzeptanz und damit auch Bedienung deutlich erleichtern. Dies setzt jedoch eine genaue Kenntnis der Zielgruppe der „Bewohner/innen“ voraus.

### 5.4.2 Maßnahmen vor der Sanierung

Mit den Maßnahmen vor der Sanierung soll unterschiedlichen Problemen bereits im Vorfeld begegnet werden. Ein Problem ist die von den Bewohnern/innen in den Interviews kritisierte komplexe Bedienung der neuartigen technischen Geräte. Hier zeigt sich zunächst Entwicklungsbedarf: Offenbar können noch einfachere, intuitivere Bedienungssysteme entwickelt und Bedienungsanleitungen verständlicher gestaltet werden. Die Auswertung zeigt: Viele Bewohner/innen äußerten die Absicht, die neu verbauten technischen Geräte, z. B. Lüftungsanlagen, bewusst regeln zu wollen. Auf dieses Feedback kann man reagieren, indem man von vornherein technische Geräte auswählt, die sich individuell und manuell steuern lassen. Darüber hinaus sollte in dieser Phase damit begonnen werden, die Bewohnerschaft regelmäßig zu informieren. Zum Start können beispielsweise Informationsabende zu den geplanten Sanierungen durchgeführt werden; dabei werden den Bewohnern/innen die berechneten Energieeinsparungen erläutert und im Gegenzug ihr Feedback zu den geplanten Sanierungsmaßnahmen eingeholt. Aus diesem Feedback ergibt sich außerdem die Möglichkeit, die Einsparpotenziale auf Grundlage individueller Komfortpräferenzen und historischer Energieverbräuche realistisch zu berechnen.

### 5.4.3 Maßnahmen nach der Sanierung

Nach einer Inbetriebnahmephase können die Bewohner/innen ihr Feedback zur Funktionsweise und Wirkung der Sanierungsmaßnahmen geben. So erhalten die Verantwortlichen – z. B. Sanierungsmanager, Hausmeisterin oder Techniker – die Gelegenheit, entsprechend zu reagieren. Letztendlich soll dies auch die Interaktion zwischen Mensch und Technik verbessern. Gegebenenfalls könnte nicht nur einmalig der Energieverbrauch erhoben und ein Meinungsbild zum thermischen Komfort sowie zum Heiz- und Lüftungsverhalten der Bewohnerschaft eingeholt werden, sondern letztendlich eine Panel-Studie initiiert werden, in deren Rahmen jährlich Messdaten erfasst sowie eine Befragung zum Heiz- und Lüftungsverhalten durchge-

führt und dann beides zusammen analysiert werden. In diesem Zusammenhang könnten auch saisonale Effekte erfasst sowie mögliche Gewöhnungseffekte gemessen werden. Dieses ausführliche Monitoring nicht nur der technischen Komponenten, sondern auch des Feedbacks der Bewohner/innen ergibt für die Verantwortlichen letztlich ein umfassendes Bild des Gesamtprojekts.

## 5.5 Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den im letzten Abschnitt genannten übergreifenden Maßnahmen die wesentlichen Herausforderungen angegangen werden können, Bewohner/innen energetisch sanierter Wohngebäude einzubinden. Rein technische Probleme müssen gelöst werden, indem die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen bereits während der Sanierung überprüft und später mithilfe eines konsequenten Monitoring überwacht und dabei auch Rückmeldungen der Bewohnerschaft eingeholt werden.

Die Differenz zwischen Funktionsweise der Technik und Lebensgewohnheiten der Bewohner/innen lässt sich derzeit aufgrund des Stands der Technik und verschiedener Interessen bezüglich der Sanierungstechnik nicht leicht überbrücken. Die Sanierung ist meist rein auf Energieeffizienzsteigerung ausgerichtet, und die getroffenen Maßnahmen sind nicht unbedingt mit den Gewohnheiten und Einstellungen der Bewohner/innen kompatibel. Beispielsweise ist eine Flächenheizung energieeffizienter als die bisher üblichen und den Bewohner/innen vertrauten Heizkörper. Die Flächenheizung benötigt aber vergleichsweise längere Zeit, um einen Raum aufzuheizen. Somit können sich die Gewohnheit der Bewohner/innen, einen Raum schnell aufzuheizen und schnell den gewünschten thermischen Komfort zu erzeugen, und die Funktionsweise der neuartigen Technik entgegenstehen. Eine Lösung ist, die Sanierungstechnik im Vorfeld auf die Gewohnheiten der Bewohnerschaft abzustimmen, indem man den thermischen Komfort sowie das Heiz- und Lüftungsverhalten der Bewohner/innen im Vorfeld der Sanierung erhebt. Diese Vorgehensweise kann allerdings zu Interessenkonflikten mit den Eigentümern führen, die meist den Kostenfaktor bei der Sanierung im Blick haben. Individuelle Sanierungslösungen für einzelne Wohnungen bedeuten höhere Kosten und sind dementsprechend unattraktiv. Eine weitere Option sind smarte Technologien. Diese können durch lernende Algorithmen die Gewohnheiten und Routinen der Bewohner/innen nach einer Einarbeitungsphase imitieren und so möglichen Konflikten vorbeugen. Eine weitere Möglichkeit, die Interaktion von Mensch und Technik zu verbessern, kann es sein, durch umfassende Information darauf hinzuwirken, dass die Bewohnerschaft ihre Lebensgewohnheiten an die Arbeitsweisen der neuartigen Techniken anpasst. Einfluss auf die Handlungsweisen und Routinen der Bewohner/innen zu nehmen, ist allerdings in der Kommunikation heikel und bisher auch unzureichend erforscht, um angemessene Empfehlungen formulieren zu können. Dieser Weg sollte grundsätzlich sehr vorsichtig und nur mit Zustimmung der Betroffenen beschritten werden.

Grundsätzlich wird aus den erhobenen Daten einmal mehr deutlich, dass eine kontinuierliche Kommunikation zwischen allen Beteiligten (Wohnverwaltung, Bewohner/innen, Sanierungsmanager/in, Hausmeister/in, Techniker/innen etc.) der beste Weg ist, um mögliche Probleme bereits im Vorfeld zu identifizieren und zu klären. Daneben ist eine Einführung in die Funktionsweise und Bedienung neuartiger Technik für alle Bewohner/innen unabdingbar, ggf. auch um gruppenspezifische (also geschlechts- und altersspezifische) Effekte zu minimieren. Das Ziel der Maßnahmen, den Komfort der Bewohnerschaft zu maximieren und gleichzeitig den Energieverbrauch zu minimieren, sollte während aller Phasen eines Sanierungsvorhabens aktiv verfolgt werden.

## 6 Die Gebäude-Performance

Autoren: Davide Calì, Tanja Osterhage, Rita Streblow, Dirk Müller

Für den Wert eines Gebäudes sind u. a. die geografische Lage, der generelle Bauzustand und die Architektur von Relevanz. Zusätzlich spielen auch energetische Faktoren eine große Rolle. Zum Beispiel müssen Gebäudehülle und Anlagentechnik möglichst effizient den Komfort bzw. eine gute Raumluftqualität gewährleisten. Zudem sollen die Betriebskosten sowie die Umweltbelastungen gering gehalten werden. Die gesetzlichen Vorgaben dafür dürfen weder bei Sanierungen noch bei Neubauten überschritten werden (siehe Kapitel 3.1).

In der Praxis weichen Verbrauchs- und Bedarfsenergiekennzahlen häufig voneinander ab (Hens et al. 2010), so auch im hier betrachteten Sanierungsprojekt. Oft hat das zur Konsequenz, dass die Nutzer/innen unzufrieden sind. Die Ursachen für diese Abweichungen werden im Folgenden für das Sanierungsprojekt in Karlsruhe-Rintheim untersucht. Zunächst werden die Bedarfswerte der jeweiligen Sanierungsvariante erläutert und diskutiert. Dafür werden die während der vier betrachteten Jahre vor Ort gemessenen Wetterdaten untersucht. Daraus können die Bedarfswerte unter real gemessenen Wetterbedingungen ermittelt werden. Der so berechnete Bedarf wird als „Zielverbrauch“ definiert. Anschließend werden Zielverbrauch und realer Verbrauch verglichen und das Energy Performance Gap (EPG) bzw. die Primärenergieeinsparindizes berechnet. Die entstehenden Abweichungen werden erläutert und mögliche technische Fehler erörtert und analysiert. Abschließend erfolgt eine Bewertung des Nutzerverhaltens.

### 6.1 Berechnete Energiebedarfswerte

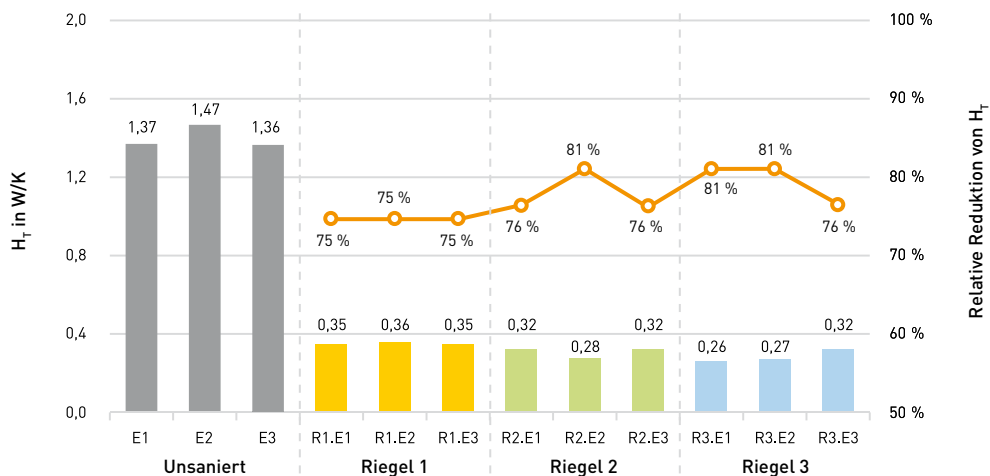
Der spezifische Transmissionswärmeverlust  $H_T$  gibt die Güte der wärmeübertragenden Umfassungsfläche wieder. Abb. 6-1 (Seite 68) stellt den spezifischen Transmissionswärmeverlust vor und nach der Sanierung für jeden Eingang pro Riegel gegenüber. Die Dämmung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche sowie der Austausch der Fenster führen für Riegel 1 zu einer Reduktion des Transmissionswärmeverlusts um 75 %. Für Riegel 2 und 3 schwankt die prozentuale Einsparung zwischen 76 % bei einer Sanierung mit Standard-Kunststoff-Fenstern und 81 % bei einer Sanierung mit Passivhausfenstern. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Eingängen eines Riegels sind durch die baukonstruktive Sanierung und die jeweils variierende wärmeübertragende Umfassungsfläche zu erklären (Mittleingang gegenüber Eckeingang).

Der spezifische Heizwärmebedarf erlaubt eine Aussage über das Zusammenwirken der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sowie das Nutzerverhalten unter normativen

### Gegenüberstellung des spezifischen Transmissionswärmeverlusts vor und nach der Sanierung

**Abb. 6-1:** Spezifischer Transmissionswärmeverlust

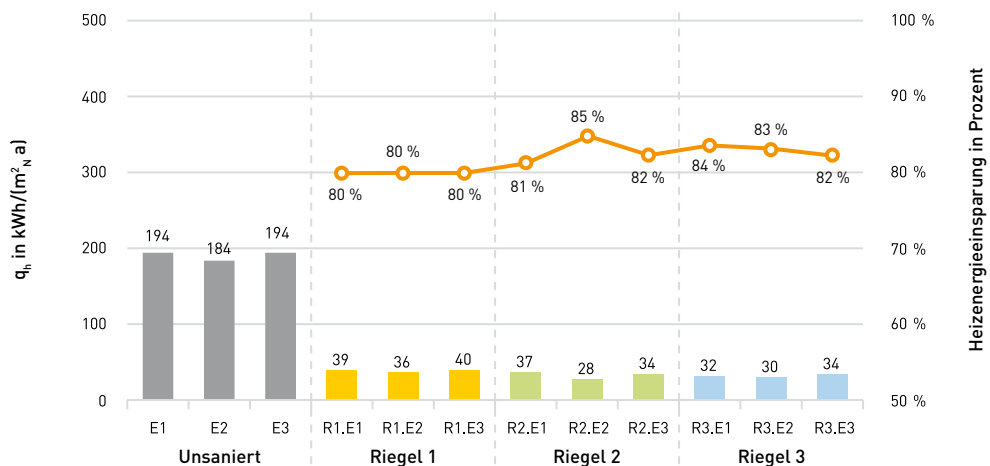
- vor der Sanierung
- Riegel 1 nach der Sanierung
- Riegel 2 nach der Sanierung
- Riegel 3 nach der Sanierung



### Vergleich des spezifischen Heizwärmebedarfs vor und nach der Sanierung

**Abb. 6-2:** Spezifischer Heizwärmebedarf pro Eingang und Riegel

- vor der Sanierung
- Riegel 1 nach der Sanierung
- Riegel 2 nach der Sanierung
- Riegel 3 nach der Sanierung

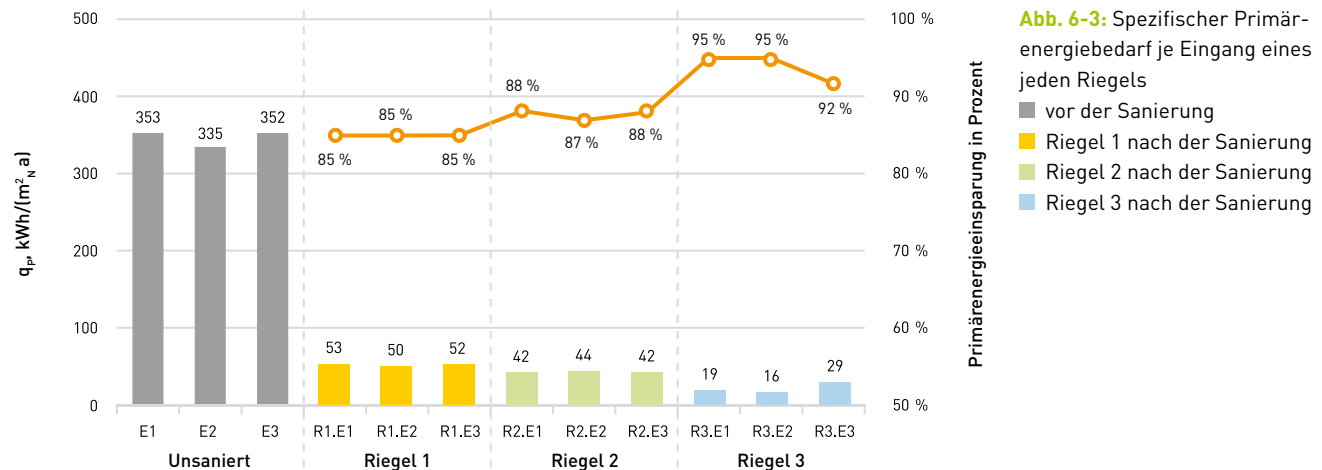


Klimarandbedingungen. Abb. 6-2 stellt den Heizwärmebedarf (ohne Berücksichtigung der WRG) pro Eingang und Riegel vor und nach der Sanierung gegenüber.

Die anlagentechnische und baukonstruktive Sanierung hat zu einer deutlichen Reduzierung des Heizwärmebedarfs geführt. Riegel 1 weist einen um 80 % niedrigeren Heizwärmebedarf als vor der Sanierung auf. Die prozentualen Einsparungen erhöhen sich bei Riegel 2 je nach Eingang auf 81 % für Eingang 1 (Südfassade in Kombination mit einer maschinellen Lüftungsanlage) und 85 % für Eingang 2 (Verwendung von Dreifachverglasung). Die Werte für Riegel 3 weichen nicht signifikant von den Werten aus Riegel 2 ab. Für Eingang 3 ergeben sich 82 % (Nordgiebel und Standard-Kunststoff-Fenster) und im Gegensatz dazu 84 % für Eingang 1.

Der spezifische Primärenergiebedarf  $q_p$  gibt den Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes inkl. der vorgelagerten Energieketten für die Wandlung, Speicherung etc. und somit seine Umweltwirkung an. Für die Berechnung des Primärenergiebedarfs wurden die aktuellen Primärenergiefaktoren nach EnEV 2014 (gültig ab 2016) benutzt:  $f_{p,Strom} = 1,8$ ,  $f_{p,Gas} = 1,1$ ,  $f_{p,Fernwärme} = 0,7$ . Abb. 6-3 ist der Primärenergiebedarf je Eingang und Riegel vor und nach der Sanierung zu entnehmen. Die berechnete Primärenergieeinsparung gegenüber dem Ursprungszustand variiert zwischen 85 % für Riegel 1 und maximal 95 % für Eingang 2 von Riegel 3. Die höchsten Einsparungen ergeben sich durch die Verwendung von Wärmepumpentechnik in Verbindung mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und Passivhausfenstern.

#### Spezifischer Primärenergiebedarf vor und nach der Sanierung



## 6.2 Reale Wetterdaten

Der Energiebedarf eines Gebäudes hängt stark von den klimatischen Randbedingungen ab. Die Außentemperatur, die Sonneneinstrahlung auf opake sowie transluzente Bauteile, die Windgeschwindigkeit und die relative Feuchte haben Einfluss auf den Energieverbrauch eines Gebäudes. Für die EnEV-Berechnungen wird daher auf einen Standardwettersatz aus DIN V 18599-10 zurückgegriffen.

**Tabelle 6-1:** Monatsmittelwerte der Außentemperatur nach deutschem Standardwettersatz (Potsdam, DIN V 18599-10) und für Karlsruhe in den Jahren 2011 bis 2014

|           | $T_{a \text{ DE EnEV}}$<br>in °C | $T_{a \text{ 2011}}$<br>in °C | $T_{a \text{ 2012}}$<br>in °C | $T_{a \text{ 2013}}$<br>in °C | $T_{a \text{ 2014}}$<br>in °C |
|-----------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Januar    | -1,3                             | 2,4                           | 3,2                           | 1,6                           | 4,6                           |
| Februar   | 0,6                              | 3,5                           | -1,8                          | 0,2                           | 5,8                           |
| März      | 4,1                              | 7,6                           | 8,9                           | 2,9                           | 9,0                           |
| April     | 9,5                              | 14,1                          | 10,0                          | 10,2                          | 13,1                          |
| Mai       | 12,9                             | 17,0                          | 16,5                          | 12,4                          | 14,5                          |
| Juni      | 15,7                             | 18,8                          | 18,5                          | 18,2                          | 18,7                          |
| Juli      | 18,0                             | 17,9                          | 19,6                          | 22,4                          | 20,5                          |
| August    | 18,3                             | 20,3                          | 21,5                          | 20,0                          | 18,0                          |
| September | 14,4                             | 17,6                          | 15,7                          | 15,4                          | 16,3                          |
| Oktober   | 9,1                              | 10,7                          | 9,9                           | 11,9                          | 13,4                          |
| November  | 4,7                              | 5,4                           | 6,0                           | 5,3                           | 7,3                           |
| Dezember  | 1,3                              | 5,0                           | 3,6                           | 3,8                           | 3,9                           |
| Jahr      | 8,9                              | 11,7                          | 11,0                          | 10,4                          | 12,1                          |

Das in Abschnitt 3.1 beschriebene Berechnungsverfahren nach EnEV basiert auf dem Referenzklima nach DIN V 18599-10. Zwei Wetterfaktoren üben großen Einfluss auf den Energiebedarf aus: zum einen die Außentemperatur und zum anderen die Globalstrahlung auf die Horizontalebene. Einen Überblick über den Standardwetterdatensatz sowie die Messdaten vor Ort in Karlsruhe für die Jahre 2011 bis 2014 geben Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2. Bei detaillierter Betrachtung der Werte fällt auf, dass die Jahre 2011 und 2014 besonders warm waren, d. h., deutlich über dem Referenzklima mit einer Durchschnittstemperatur von 8,9 °C lagen. Die gemessene globale Sonnenstrahlung ist für das Jahr 2011 um 10 % stärker ausgefallen als die Werte des Standardwetterdatensatzes. Im Jahr 2012 liegen die gemessenen Werte im Bereich des Standardwetterdatensatzes. In den Folgejahren 2013 und 2014 fallen die gemessenen Werte der globalen Sonnenstrahlung um 10 % niedriger aus als die des Standardwetterdatensatzes.

Unter Berücksichtigung der Heizperiode kann festgehalten werden, dass die gemessene Globalstrahlung tendenziell höher ausfällt als die Werte des Standardwetterdatensatzes. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass für den Betrachtungszeitraum und dessen Heizperiode höhere Temperaturen und höhere Sonneneintragswerte als im Standardwetterdatensatz vorhanden sind.

|           | $G_{DE,EnEV}$<br>in kWh/m <sup>2</sup> | $G_{2011}$<br>in kWh/m <sup>2</sup> | $G_{2012}$<br>in kWh/m <sup>2</sup> | $G_{2013}$<br>in kWh/m <sup>2</sup> | $G_{2014}$<br>in kWh/m <sup>2</sup> |
|-----------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Januar    | 24,6                                   | 25,1                                | 24,3                                | 23,3                                | 24,8                                |
| Februar   | 34,9                                   | 40,6                                | 51,0                                | 32,8                                | 42,5                                |
| März      | 61,0                                   | 102,7                               | 103,1                               | 77,8                                | 94,6                                |
| April     | 136,8                                  | 160,9                               | 115,4                               | 104,1                               | 121,1                               |
| Mai       | 157,0                                  | 192,7                               | 171,1                               | 113,3                               | 147,8                               |
| Juni      | 184,3                                  | 153,2                               | 151,4                               | 162,2                               | 157,2                               |
| Juli      | 189,7                                  | 153,3                               | 149,0                               | 176,9                               | 132,2                               |
| August    | 133,2                                  | 145,7                               | 142,8                               | 135,2                               | 119,7                               |
| September | 97,2                                   | 107,4                               | 107,4                               | 86,8                                | 84,5                                |
| Oktober   | 55,8                                   | 75,2                                | 58,5                                | 54,6                                | 58,2                                |
| November  | 28,1                                   | 32,9                                | 27,5                                | 23,5                                | 26,6                                |
| Dezember  | 16,4                                   | 17,8                                | 19,7                                | 19,2                                | 14,5                                |
| Jahr      | 1.119,0                                | 1.207,5                             | 1.121,3                             | 1.009,7                             | 1.023,7                             |

**Tabelle 6-2:** Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die Horizontalebene nach Standardwetteratz (Potsdam, DIN V 18599-10) und für Karlsruhe in den Jahren 2011 bis 2014

### 6.3 Gemessener Energieverbrauch der Gebäude

Die in Kapitel 6.1 bereits eingeführten Kennzahlen werden für die Bewertung der beschriebenen Sanierungsvarianten unter realen Nutzungs- und Klimabedingungen berechnet. Für den Vergleich von Bedarfs- und Verbrauchsdaten von Gebäuden müssen die gemessenen Verbrauchsdaten witterungsbereinigt werden. Die VDI 3807-1 gibt ein Verfahren für die Witterungsbereinigung von Verbrauchsdaten vor. Hierbei werden die gemessenen Daten mit einem Temperaturkorrekturfaktor multipliziert. Durch dieses Verfahren können die Verbrauchswerte der Gebäude für unterschiedliche Jahre und Standorte verglichen werden.

Das Verfahren nach VDI 3807-1 berücksichtigt lediglich die Temperatur und lässt die (unterschiedliche) Strahlungsintensität außer Acht. Gerade bei einem Gebäude mit großem Fensterflächenanteil haben aber die solaren Gewinne großen Einfluss auf den sich einstellen-

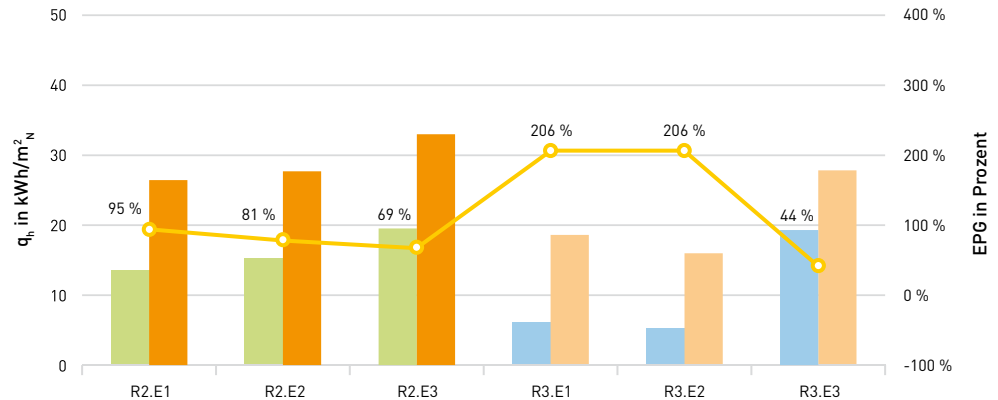


den Energieverbrauch. Das in Kapitel 3.1 beschriebene normative Berechnungsverfahren ist in eine eigens entwickelte Visual-Basic-Software implementiert worden. Diese erlaubt die Berücksichtigung von gemessenen Wetterdaten (inkl. Globalstrahlung). In den folgenden Abbildungen (Abb. 6-4, Abb. 6-5) sind die berechneten Heizenergiebedarfswerte unter Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung und des tatsächlichen Wetters (Zielverbräuche) den gemessenen Heizenergieverbrauchswerten für die Jahre 2011 bis 2014 gegenübergestellt. Die Sanierung von Riegel 3 hat längere Zeit in Anspruch genommen, so dass eine Belegung durch die Mieter erst im Laufe des Frühjahrs 2011 möglich war. Die Daten für das Jahr 2011 sind deshalb nicht vollständig und die Werte in abgeschwächter Farbtiefe dargestellt.

#### Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (witterungsbereinigt) und -verbrauchs

**Abb. 6-4:** Berechneter Heizenergiebedarf unter Berücksichtigung des gemessenen Wetters und des Heizenergieverbrauchs (orange) für die drei Eingänge von Riegel 2 und Riegel 3 im Jahr 2011

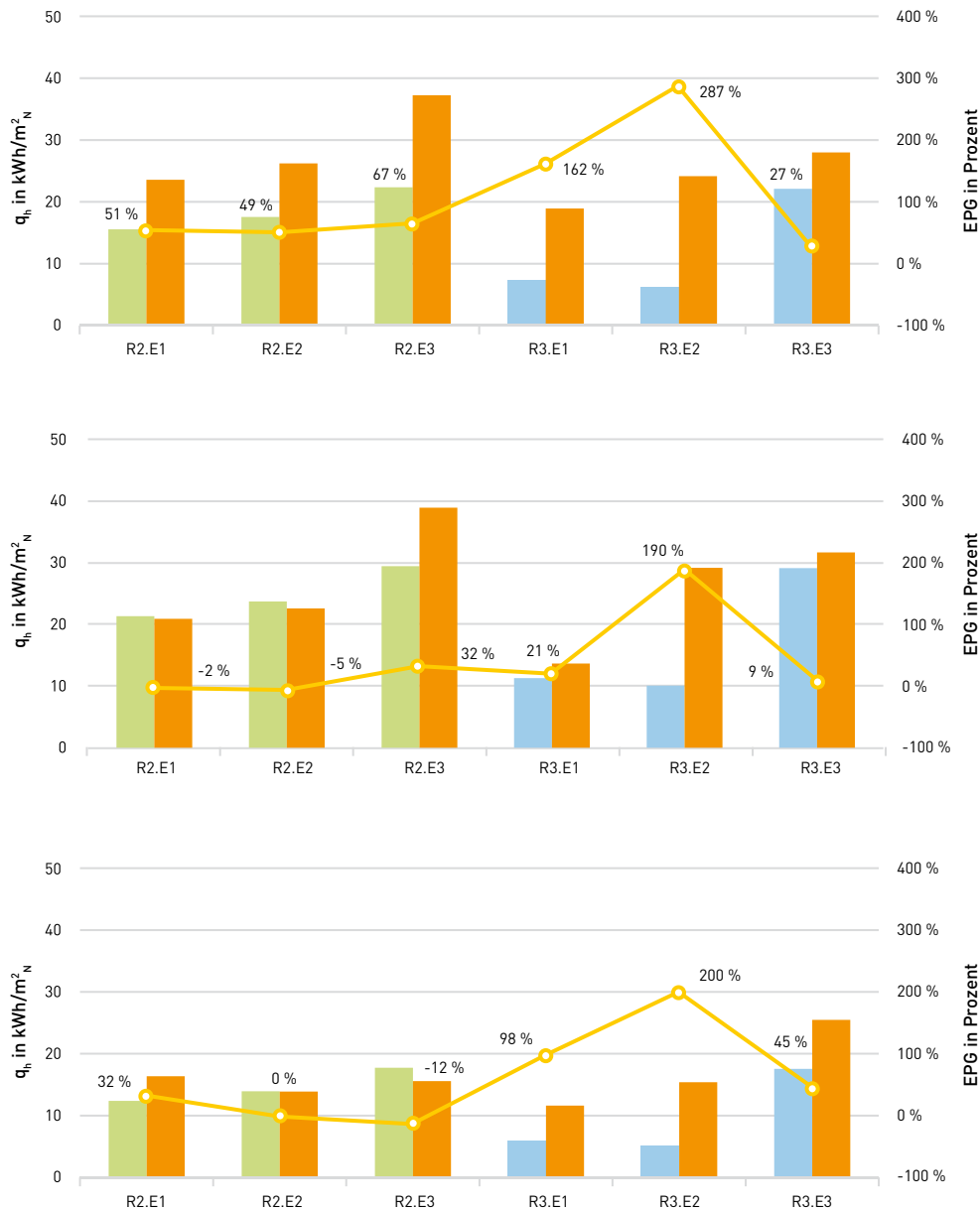
- HEB 2011, Riegel 2
- HEB 2011, Riegel 3
- HEV 2011
- EPG (HE) 2011



Je nach Sanierungsvariante liegt das Energy Performance Gap (EPG) im Jahr 2012 zwischen 27 % und 287 %. Im Jahr 2013 variieren die Werte zwischen -5 % und 190 % und im Jahr 2014 zwischen -12 % und 200 %. Im Vergleich zu 2011 und 2012 fallen die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch im Jahr 2013 geringer aus, steigern sich allerdings im Jahr 2014 wieder. Eine Gegenüberstellung der Daten von 2012 und 2014 zeigt, dass im Jahr 2014 ein niedrigeres Energy Performance Gap festzustellen ist. Diese Reduktion kann u. a. durch Nutzerbefragungen und Interviews, persönliche Gespräche sowie Vortragsveranstaltungen zum korrekten Heizen und Lüften erzielt worden sein.

Die Entwicklung des Energy Performance Gap für Riegel 2 zeigt, dass das Nutzerverhalten den Energieverbrauch stark beeinflussen kann. Für Riegel 3 ist diese Entwicklung nicht feststellbar. Insbesondere die beiden Eingänge 1 und 2 mit Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung schneiden vergleichsweise schlecht ab. Dieser Effekt wird besonders in Eingang 2 des Riegels 3 bemerkbar, wo die Wärmerückgewinnung zentral bei Beheizung der Räume

## Gegenüberstellung des Heizwärmebedarfs (witterungsbereinigt) und -verbrauchs



**Abb. 6-5:** Berechneter Heizenergiebedarf unter Berücksichtigung des gemessenen Wetters und des Heizenergieverbrauchs (orange) für die drei Eingänge von Riegel 2 und Riegel 3 in den Jahren 2012 (oben), 2013 (Mitte) und 2014 (unten)

■ HEB 2012, 2013, 2014, Riegel 2

■ HEB 2012, 2013, 2014, Riegel 3

■ HEV 2012, 2013, 2014

● EPG (HE) 2012, 2013, 2014

über die Lüftungsanlage erfolgt. Die Schwankungen des Energy Performance Gap 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. Dies wird in Abschnitt 6.4 und 6.5 weiter analysiert.

Die Unterschiede zwischen Bedarf und Verbrauch sind kumulativ in 2013 nicht erheblich, im Jahr 2014 sind sie wieder größer. Die durchschnittliche Außentemperatur ist 2014 höher als in den Vorjahren, daher fallen die absoluten Bedarfs- und Verbrauchswerte extrem niedrig aus. Bei diesen geringen Verbräuchen sind die relativen Unterschiede, die durch das Energy Performance Gap abgebildet werden, verhältnismäßig hoch. Die Differenz zwischen Bedarf und Verbrauch liegt z. B. im Jahr 2014 für Riegel 3, Eingang 1 unter  $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , was allerdings zu einem Energy Performance Gap von 98 % führt. In diesem Jahr weist Eingang 2 des Riegels 3 die größte Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch auf, hier beläuft sich das Energy Performance Gap auf 200 % (siehe Abb. 6-5, Seite 73).

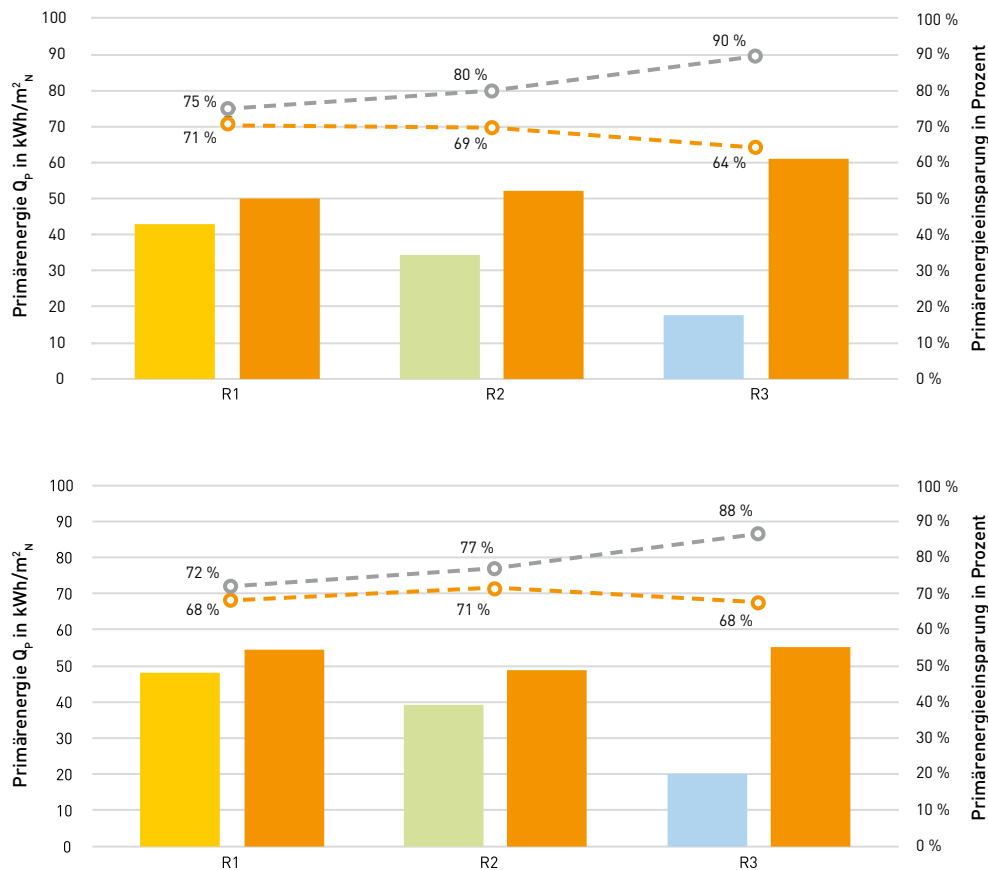
Eine Analyse des Lüftungsverhaltens zeigt deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Eingängen des Riegels 3. Insbesondere während der Heizperiode wird in Eingang 2 deutlich häufiger auf die Fensterlüftung zurückgegriffen. Die durchgeführte Befragung gibt Aufschluss darüber, dass die Luftheizung von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

Um das Nutzerverhalten im Zusammenspiel mit der Anlagentechnik und den vorgelagerten Prozessketten zu bewerten, werden Primärenergiebedarf und Primärenergieverbrauch verglichen und der Primärenergieeinsparindex gebildet.

Abb. 6-6 (Seite 75) stellt den Primärenergiebedarf und -verbrauch je Riegel für die Jahre 2012 (oben) und 2013 (unten) sowie den Primärenergieeinsparindex gegenüber. Aufgrund von Datenausfällen werden hier nur die Jahre 2012 und 2013 verglichen. Vor der Sanierung lag der mittlere Primärenergieverbrauch pro Riegel bei  $175 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Nach der Sanierung ergibt sich für das Jahr 2012 eine Abweichung zwischen Primärenergiebedarf und -verbrauch von zwischen 4 % für Riegel 1 und 26 % für Riegel 3. Im Jahr 2013 reduziert sich diese Differenz ein wenig, auf 4 % bei Riegel 1 und 20 % bei Riegel 3.

Wie auch bei der Betrachtung der Heizenergie ergeben sich im Bereich des Primärenergievergleichs im Jahr 2013 niedrigere Werte. Für Riegel 1 fällt die Differenz so gering aus, dass dies auf die Sensorungenauigkeit zurückgeführt werden kann. Die Abweichung zwischen Primärenergiebedarf und -verbrauch fällt für Riegel 2 geringer aus und liegt zwischen 11 % und 6 %. Dies lässt sich ebenfalls auf die Ungenauigkeit der Mess-Sensoren zurückführen. Die Auswirkungen von intensiven Mietergesprächen sind in diesen Daten gut zu erkennen. Für Riegel 3 fällt die Differenz zwischen Primärenergiebedarf und -verbrauch erheblich aus, auch wenn 2013 ein kleiner Rückgang zu verzeichnen ist. Die Gründe für die Abweichung zwischen Primärenergiebedarf und -verbrauch sind vielfältig und nicht nur auf das Nutzerverhalten, sondern auch auf Fehlfunktionen der Anlagentechnik zurückzuführen, welche im Weiteren genauer betrachtet werden.

### Gegenüberstellung Primärenergiebedarf (witterungsbereinigt) und -verbrauch



**Abb. 6-6:** Primärenergiebedarf und -verbrauch (orange) in den Jahren 2012 und 2013 sowie Darstellung des Primärenergieeinsparindex

- PE-Bedarf, Riegel 1
- PE-Bedarf, Riegel 2
- PE-Bedarf, Riegel 3
- PE-Verbrauch
- Erwartete Einsparung
- Gemessene Einsparung

## 6.4 Fehlfunktionen der Anlagentechnik

In vielen Fällen werden allein die Nutzer/innen für den erhöhten Energieverbrauch der Gebäude verantwortlich gemacht (Dall'O' et al. 2012; Fokaidis et al. 2011; Hong et al. 2006). Im Zuge der hier vorliegenden Messdatenanalyse konnten Unterschiede im Nutzerverhalten festgestellt werden, die unterschiedliche Energieverbräuche mit sich bringen. Durch die Anzahl von zehn Wohneinheiten pro Eingang ergibt sich im Mittel ein repräsentativer Querschnitt der Verbrauchsdaten. Aber nicht nur der Nutzer ist für den Mehrverbrauch verantwortlich.

Auch Fehlfunktionen der Anlagentechnik spielen eine Rolle, die durch das Monitoring-System aufgedeckt wurden und hier beschrieben werden.

#### 6.4.1 Trinkwarmwasserbereitung

Zur Bereitstellung des Trinkwarmwassers wurden in Eingang 1 des Riegels 2 sowie in Riegel 3 dezentrale Frischwasserstationen installiert. Im Zuge der Planung wurden die Trinkwarmwassersysteme für geringe Zapftemperaturen (35 °C) ausgelegt. Aufgrund des überaus hohen Kalkgehaltes im Trinkwasser sind die Geräte sehr schnell verkalkt und haben – aufgrund des dadurch reduzierten Durchflussvermögens – nur noch kälteres Trinkwarmwasser bereitstellen können. Dies hat zu großer Unzufriedenheit bei den Mietern geführt. Nach den Mieterbeschwerden wurden die Zapftemperaturen entsprechend angehoben. Die erhöhten Temperaturen sowie die Verkalkungsproblematik führen aber zu einem steigenden Energieverbrauch. Dieser Effekt fällt für Riegel 3 stärker aus, da die angehobenen Zirkulationstemperaturen sowohl erhöhte Verteilverluste als auch eine ineffiziente Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpen mit sich bringen.

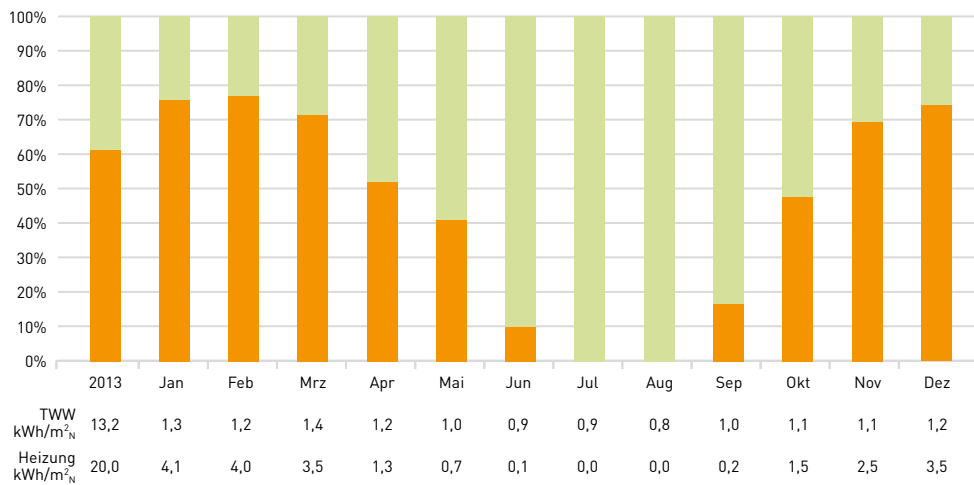
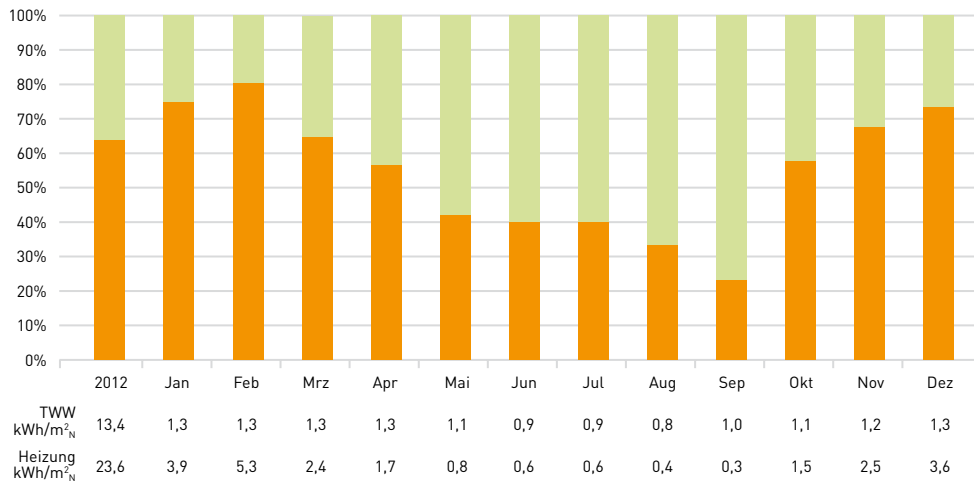
#### 6.4.2 Energieverteilung und -übergabe

In den Jahren 2011 und 2012 lässt sich sogar in den Sommermonaten ein Heizenergieverbrauch für alle Eingänge ablesen. Als Folge dieser Erkenntnis wurde seit dem Jahr 2013 die Heizungsanlage in den Sommermonaten abgestellt.

In Abb. 6-7 sind die Verbrauchsdaten für Trinkwarmwasser sowie Heizung beispielhaft für Riegel 2, Eingang 1 in den Jahren 2012 und 2013 gegenübergestellt. Im Jahr 2012 sind sowohl eine höhere durchschnittliche Außentemperatur als auch höhere Sonneneintragswerte als im Jahr 2013 ablesbar. Die Abschaltung der Heizungsanlage außerhalb der Heizperiode hat dazu geführt, dass der Heizenergieverbrauch im Jahr 2013 um 15 % gesunken ist.

Abb. 6-8 (Seite 78) zeigt den Heizenergieverbrauch und den Energieverbrauch für Trinkwarmwasser auf Wohnungsebene bzw. im Keller, gemessen für alle Eingänge des Riegels 3 im Jahr 2012. Der prozentuale Anteil der Verteilverluste am jeweiligen Energieverbrauch ist auf der rechten Seite aufgetragen. Aufgrund der Ungenauigkeit der Wärmemengenzähler kommt es in Eingang 3 des Riegels zu negativen Verlusten auf der Heizungsseite, das heißt, es wird mehr Energie an die Wohnungen geliefert, als vom Pufferspeicher zur Verfügung gestellt wird. Auch bei der Berücksichtigung der Messungenauigkeit bleiben die Verteilverluste für den Bereich Trinkwarmwasser in Eingang 1 und Eingang 2 noch sehr hoch.

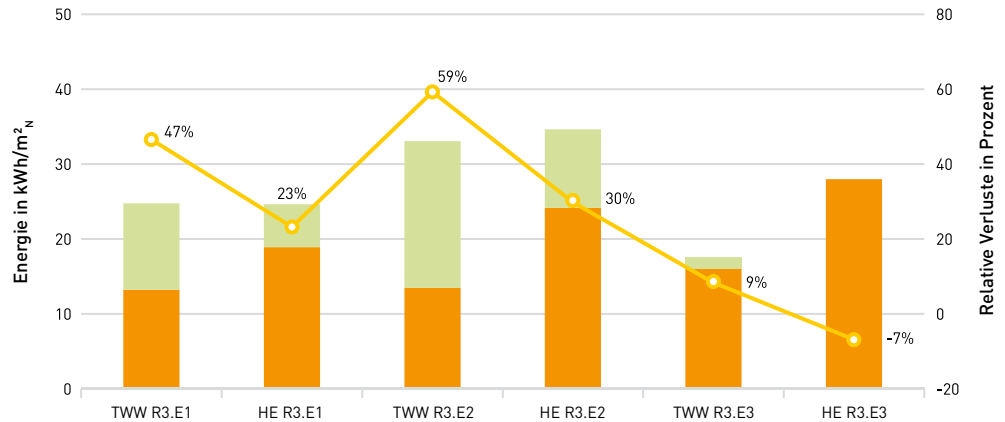
## Gegenüberstellung des Energieverbrauchs für Heizen und Trinkwarmwasser



### Energieverbrauch für Heizen und Trinkwarmwasser sowie Verteilungsverluste

**Abb. 6-8:** Heizenergieverbrauch und Energieverbrauch für Trinkwarmwasser inkl. der jeweiligen Verluste für Riegel 3 im Jahr 2012

- Verteilverluste
- Gelieferte Energie
- Relative Verluste



### 6.4.3 Wärmepumpen

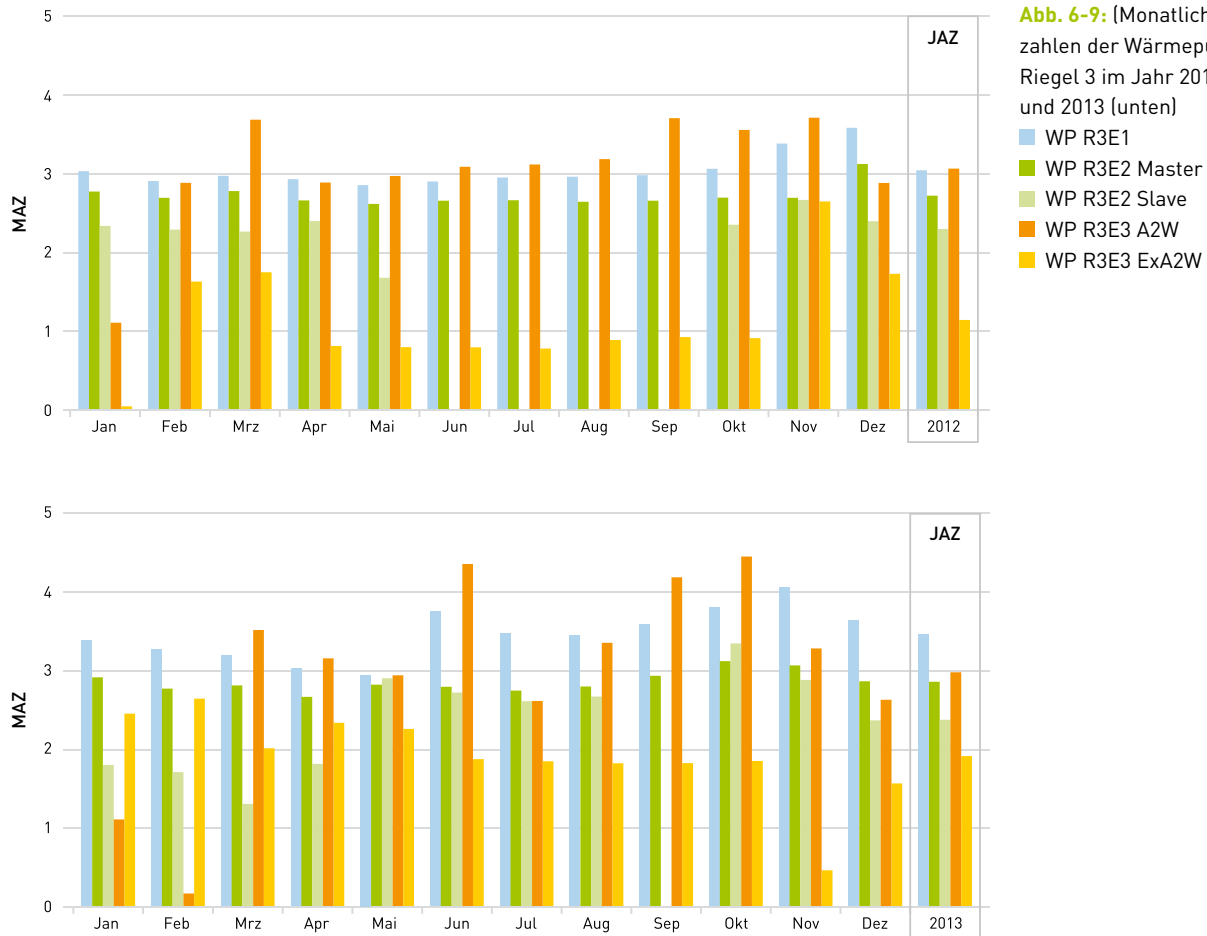
Die in diesem Abschnitt dargestellten Arbeitszahlen der Wärmepumpen beziehen sich lediglich auf eine Energiebilanz der Wärmepumpen. Energieverluste für die Speicherung und Verteilung sind darin nicht berücksichtigt.

Die in Riegel 3 installierten Wärmepumpen sind zum Teil für die erhöhten Verbrauchswerte verantwortlich. Abb. 6-9 stellt die jeweiligen Monats- und Jahresarbeitszahlen (MAZ bzw. JAZ) der Wärmepumpen pro Eingang von Riegel 3 für die Jahre 2012 und 2013 gegenüber.

Im Herbst 2012 fand ein Software-Update der Wärmepumpensystems seitens des Herstellers statt, weshalb ab November 2012 höhere Monatsarbeitszahlen als in den Vorgängermonaten feststellbar sind. Die in Eingang 1 installierte Wärmepumpe weist die höchste Jahresarbeitszahl auf, die im Jahr 2013 bei 3,5 liegt. Die Jahresarbeitszahlen der eingebauten Wärmepumpen (Master-Slave-System) in Eingang 2 fallen niedriger aus als in Eingang 1. Die Jahresarbeitszahl bleibt 2012 und 2013 konstant bei 2,5. Wie zu erwarten war, fällt die Jahresarbeitszahl für die Master-Wärmepumpe höher aus als für die Slave-Wärmepumpe, die nur bei höheren Wärmeanforderungen und entsprechend größeren Temperaturspreizungen dazugeschaltet wird.

Für die Abluftwärmepumpe von Eingang 3 lässt sich eine Fehlfunktion feststellen, da die Jahresarbeitszahlen lediglich bei 1,1 im Jahr 2012 und 1,9 im Jahr 2013 liegen. Durch die Messdatenanalyse konnte ein Installationsmangel festgestellt werden; obwohl dieser beho-

## Arbeitszahlen der Wärmepumpen von Riegel 3



ben wurde, funktioniert die Wärmepumpe nicht in der zugesicherten Qualität. Für die Außenluftwärmepumpe sind zwei Monate mit einer sehr niedrigen Monatsarbeitszahl ablesbar. Diese Wärmepumpe wurde im Laufe des Feldversuchs zweimal ausgetauscht, einmal im Januar 2012 und ein zweites Mal im Februar 2013, während der Fehlfunktion wurden Heizstäbe in die Warmwasserspeichern eingebaut. Die Jahresarbeitszahl dieser Wärmepumpe – unter Zuhilfenahme der elektrischen Heizstäbe – weist einen Wert von 3,0 für die betrachtete Periode auf.



## 6.5 Betrachtung des Nutzerverhaltens

Eine Analyse der aufgezeichneten Daten auf Wohnungsebene zeigt starke Unterschiede im Nutzerverhalten. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die in den Wohnungen aufgezeichneten Daten.

### Verteilung des Heizwärmeverbrauchs

**Abb. 6-10:** Verteilung des gemessenen Heizenergieverbrauchs (gemessen auf Wohnungsebene) während der Jahre 2012 bis 2014

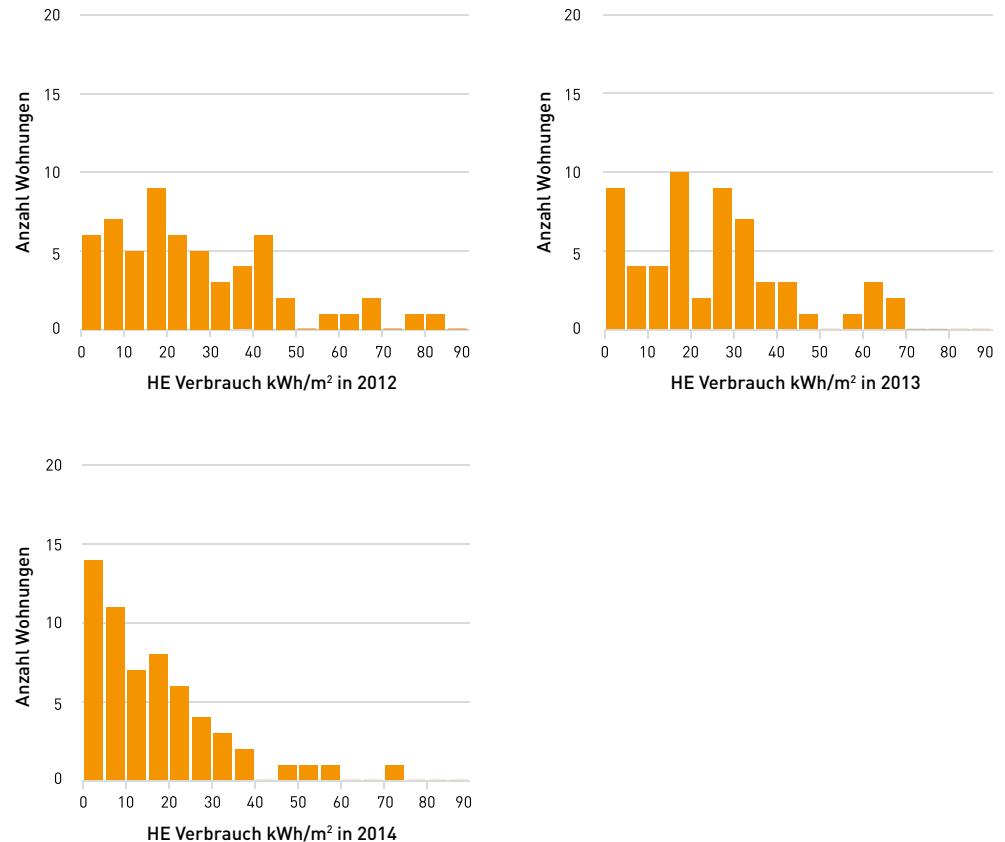
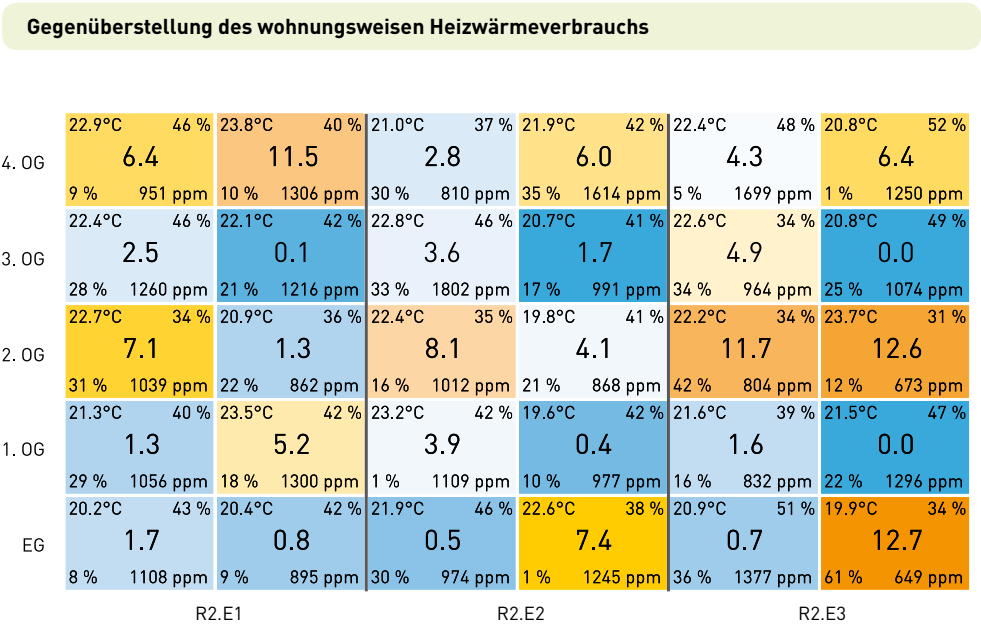


Abb. 6-10 zeigt die Verteilung des gemessenen Energieverbrauchs für Heizung auf Wohnungsebene in den Jahren 2012 bis 2014. Bei der detaillierten Betrachtung fällt auf, dass sich der Verbrauch in den drei Jahren unterschiedlich verteilt. Während in den Jahren 2012 und

2013 sechs Wohnungen mehr als 50 kWh/m² Heizenergieverbrauch aufweisen, überschreiten im Jahr 2014 nur vier Wohnungen diesen Wert. Wie bereits in Tab. 5-1 und Tab. 5-2 gezeigt, war 2014 das wärmste und sonnigste der betrachteten Jahre. Hieraus resultiert das insgesamt niedrigere Verbrauchsniveau in den Ergebnissen. 14 der betrachteten Wohnungen (23 %) haben einen Heizenergieverbrauch von unter 5 kWh/m², und beinahe die Hälfte verbrauchte weniger als 15 kWh/m².

Abb. 6-11 zeigt eine chromatische Darstellung der Fassade von Riegel 2 während eines Wintermonats. Die farbigen Boxen stehen jeweils für eine Wohnung. In der Mitte jeder Box befindet sich die Angabe zum spezifischen Heizwärmeverbrauch der jeweiligen Wohnung im betrachteten Monat. Die verwendete Farbskala richtet sich nach dem gemessenen Energieverbrauch in den Wohnungen. Orangetöne stehen für einen hohen und Blautöne für einen niedrigen Verbrauch. Die Angabe oben links steht für die gemittelte Durchschnittstemperatur in der Wohnung. Die Zahl oben rechts gibt den Wert für die durchschnittliche relative Feuchte an. Der Angabe unten links ist die durchschnittliche Fensteröffnungsdauer zu entnehmen. Das Bild vervollständigt die Angabe (unten rechts) zur durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Wohnung.

In Eingang 3 verbrauchen drei Wohnungen in diesem Betrachtungszeitraum ca. 12 kWh/m². Die benachbarten Wohneinheiten weisen im gleichen Zeitraum deutlich niedrigere Ver-



**Abb. 6-11:** Chromatische Darstellung der Fassade von Riegel 2 während eines Wintermonats

brauchswerte auf (0 bis 4,9 kWh/m<sup>2</sup>). Dies legt die Vermutung nahe, dass die angrenzenden Wohnungen im Erdgeschoss sowie im 1. und 2. OG von der Heizenergie der anderen Wohnungen profitieren. Die Werte in der Darstellung sind lediglich Durchschnittswerte über einen längeren Zeitraum (ein Monat). Trotzdem lässt sich häufig ein Zusammenhang zwischen Energieverbrauch, Innenraumtemperatur und Gesamtzeitraum mit geöffnetem Fenster feststellen. In Eingang 3 im Erdgeschoss weist die Wohnung auf der rechten Seite den höchsten Energieverbrauch auf. Die gemessenen Innentemperaturen liegen bei moderaten 19,9 °C. Während dieses Zeitraums sind die Fenster dieser Wohnung 61 % der Zeit geöffnet. Die Wohnungen im 2. OG weisen nahezu gleiche Verbrauchswerte wie die Wohnung im EG auf. Allerdings lassen sich hier deutlich höhere Innenraumtemperaturen (22,2 bzw. 23,7 °C) bei geringeren Fensteröffnungszeiten (42 bzw. 12 %) ablesen.

Um die Wärmeverschiebung zwischen den Wohnungen eines Riegels in der gegebenen Heizperiode quantifizieren zu können, wurde ein dynamisches Gebäudemodell erstellt. Das Modell wurde in der Modellierungssprache Modelica (Modelica Association, 2015) geschrieben und in der Simulationsumgebung Dymola (Dassault Systems 2014) simuliert. Die Modelle der Komponenten basieren auf Bibliotheken, welche an der RWTH Aachen University, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, entwickelt wurden.

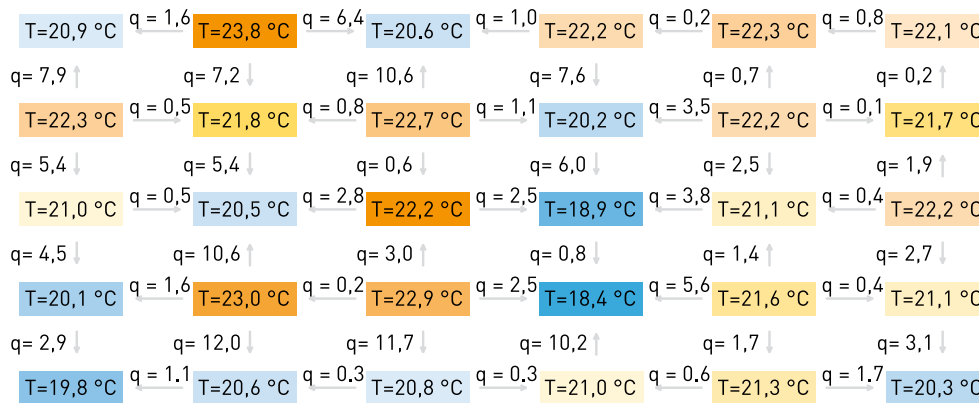
Das Gebäudemodell umfasst die komplette Baukonstruktion eines Riegels mit den drei Eingängen. Hierfür wurden die Modelle der Wände, der Decke und des Bodens aller 30 Wohnungen miteinander verknüpft. Hinzu kommt ein „Luftknotenmodell“ für jeden Raum sowie ein Dachmodell (Satteldach). Die vor Ort gemessenen Wetterdaten bilden die Grundlage für das verwendete Wettermodell. Somit ist es möglich, die diffuse sowie direkte globale Strahlung auf die Wände und Fenster zu simulieren.

Der Keller und das Treppenhaus wurden nicht modelliert. Die Temperaturen dieser Bereiche wurden durch vorangegangene Berechnungen auf 15 °C bzw. 17 °C festgelegt. Der Simulationszeitraum umfasst eine Heizperiode, Januar bis April 2013 und September bis Dezember 2013. Der Luftaustausch mit der Umgebung wurde nach der DIN V 4108-06 mit einem Luftwechsel von 0,55 pro Stunde festgelegt. In der Simulation wurden dem „Luftknoten“ für jeden Raum die jeweils gemessenen Temperaturen aufgeprägt. Der Energiefluss durch alle leitenden Komponenten (Wände, Böden/Decken, Türen und Fenster) wurde erfasst und in drei Kategorien eingeteilt: die Wärmeleitung nach außen, die Wärmeleitung zu benachbarten Wohneinheiten und die Wärmeleitung ins angrenzende Treppenhaus.

In Abb. 6-12 stehen die farbigen Boxen jeweils für eine Wohnung des Riegels 3. Der Wert in der jeweiligen Box steht für die Durchschnittstemperatur in der Wohnung während der Heizperiode. Die Farbwahl gibt die jeweiligen Temperaturbereiche wieder. Orange Boxen stehen für höhere Innentemperaturen und blaue Boxen für niedrige Innentemperaturen in den Wohnungen. Der Buchstabe q steht für die spezifische Energiemenge in kWh/m<sup>2</sup>, welche von einer Wohnung in eine benachbarte Wohnung übertragen wird. Als Bezugsgröße dient die Nutzfläche nach EnEV. Abb. 6-12 ist zu entnehmen, dass die Wärmeverschiebung durch die Trennbauteile zu den benach-

barten Wohneinheiten nicht gleich ist: Einige Wohnungen – solche mit höheren Innentemperaturen – weisen einen Wärmetransfer an die Nachbarwohnungen auf, während andere Wohnungen – solche mit niedrigeren Innentemperaturen – Wärme von den Nachbarn konsumieren. Für den hier vorgestellten Gebäuderiegel und die Heizperiode bedeutet dies, dass insgesamt 14 Wohnungen mehr Energie benötigen, als sie durch Transmission von den Nachbarn erhalten. Dagegen erhalten 16 Wohnungen mehr Energie, als sie durch Transmission verlieren.

### Wärmeverschiebung zwischen den einzelnen Wohnungen von Riegel 3



**Abb. 6-12:** Spezifische Wärmeverschiebung  $q$  in kWh/m<sup>2</sup> zwischen den Wohnungen eines Riegels in der Heizperiode 2013

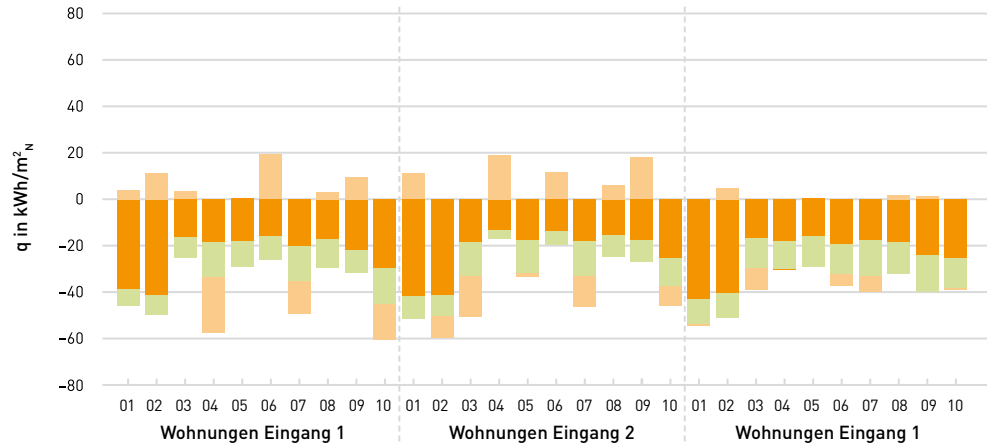
In Abb. 6-13 (Seite 84) sind die spezifischen Wärmeleitungsverluste an das Treppenhaus und die Nachbarwohnungen dargestellt. Aufgrund der Lage im Gebäude haben die Wohnungen im Erdgeschoss (W01 und W02) und auf der vierten Etage (W09 und W10) höhere Verluste an die Umgebung als die anderen Wohnungen. Die Analyse der Wärmeverschiebung innerhalb des Gebäudes zeigt, dass die Wärmegewinne durch benachbarte Wohnungen die Wärmeverschiebung nach außen und ins Treppenhaus teilweise kompensieren können. Auf der anderen Seite können die Verluste an die Nachbarwohnungen Ursache für bis zu 40 % der Wärmeverschiebungsverluste sein.

Die gewonnenen Daten legen den Schluss nahe, dass das nutzerspezifische Heizverhalten benachbarter Wohneinheiten und die damit einhergehende Wärmeverschiebung innerhalb eines Gebäudes einen großen Einfluss auf den Heizenergieverbrauch einer einzelnen Wohnung haben kann.

### Gegenüberstellung der Wärmeverluste über die Gebäudehülle, an das Treppenhaus und die benachbarte Wohnung eines Riegels

**Abb. 6-13:** Spezifische Wärmeleitungsverluste (bezogen auf die Nutzfläche nach EnEV) in kWh/m<sup>2</sup> pro Wohnung

- Wärmeverluste Gebäudehülle
- Wärmeverluste Treppenhaus
- Wärmeverluste benachbarte Wohnung



In Deutschland ist die Heizkostenabrechnung durch die Heizkostenverordnung gesetzlich geregelt. Die Heizkostenverordnung verpflichtet jeden Hauseigentümer einer gemeinschaftlich genutzten Heizungsanlage zur verbrauchsabhängigen Abrechnung der Heizkosten, mit dem Ziel, eine möglichst faire Heizkostenverteilung zu erreichen. Detailliertes Monitoring ist kostenintensiv. Die Ergebnisse der vorliegenden Analyse zeigen, dass es keine für alle Mietparteien eines Gebäudes faire Lösung darstellt, den Heizenergieverbrauch mittels Wärmemengenzähler wohnungsweise zu erfassen.

## 6.6 Zwischenfazit

Nach der Analyse der Messdaten kann zusammengefasst formuliert werden, dass der reale Energieverbrauch von den Bedarfswerten abweicht. Die Ursache für diese Abweichung zwischen den Energiekennzahlen lässt sich sowohl auf die verbaute Technik als auch auf das Verhalten der Nutzer/innen zurückführen.

Auf Basis der vorliegenden Messdaten ist es noch nicht möglich, nutzerspezifische und technische Ursachen für die Diskrepanz zwischen Bedarf und Verbrauch getrennt aufzuschlüsseln. Es muss berücksichtigt werden, dass das Nutzerverhalten stark von den normativen Vorgaben der EnEV – zum Beispiel bezüglich der Raumtemperatur und der Lüftungsintervalle – abweichen kann und menschliches Verhalten generell schwer zu erfassen und zu vergleichen ist. Die Analyse des Energy Performance Gap zeigt, dass sich in einigen Fällen

innerhalb einer Sanierungsvariante mit zehn Wohnungen das Nutzerverhalten ausgleichen und somit das berechnete Energieeinsparungsziel erreicht werden kann. Im Gegensatz dazu gibt es andere Sanierungsvarianten – wie es z. B. an Riegel 3, Eingang 2 ersichtlich ist –, bei denen der Einfluss der Bewohner/innen die Effizienz der Anlagentechnik so beeinträchtigt, dass das Energieeinsparungsziel nicht erreicht werden kann. Dies ist wiederum ein Indiz dafür, dass die Technologien nicht von allen Nutzern/innen in gleichem Maße akzeptiert bzw. richtig bedient werden. Bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen ist daher zukünftig darauf zu achten, dass die technische Ausstattung eines Gebäudes den Bedürfnissen der Nutzer/innen entspricht. Ingenieure und Techniker sollen deshalb auf die Nutzerfreundlichkeit der Bedienelemente achten und verständliche Bedienungsanleitungen erstellen. Zudem sollten Methoden entwickelt werden, die den Nutzenden ein schnelles und einfaches Feedback bieten. Die Tatsache, dass sich das Nutzerverhalten nach den Mietergesprächen geändert hat, belegt, dass richtig informierte Nutzer/innen Energie einsparen können, ohne dabei auf Komfort verzichten zu müssen.

Der Anspruch an die Effizienz eines Gebäudes bzw. dessen technische Systeme steigt stetig. Dies erfordert eine immer komplexere Anlagensystemtechnik. Monitoring-Systeme werden daher immer wichtiger, auch um technische Fehler festzustellen, welche die Effizienz eines Gebäudes beeinträchtigen können. Im vorliegenden Fall war es nur durch den Einsatz eines solchen Systems möglich, Fehler aufzudecken und zu beheben. Der Heizenergiekonsum im Sommer wurde verhindert, die Fehlfunktion der dezentralen Heizungspumpen wurde identifiziert und die Pumpen ausgewechselt, die Defekte der Abluftwärmepumpe wurden erkannt und behoben, die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen wurden durch Software-Updates gesteigert.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass der Energieverbrauch der Nutzer/innen sinkt, wenn die Anlagentechnik bewusst verwendet wird und parallel dazu die Technik auf Fehlfunktionen überwacht wird.

## 7 Fazit

Autoren: Tanja Osterhage, Davide Calí, Florian Heesen, Rita Streblov, Dirk Müller

In welchem Maße sich die energetische Modernisierung eines Bestandsgebäudes lohnt oder nicht, ist nicht pauschal zu beantworten. Jedes Gebäude hat seine eigenen Spezifika und unterscheidet sich in Baukonstruktion, Anlagentechnik und Ausstattungsmerkmalen. Letztendlich entscheiden unterschiedliche Faktoren, z. B. das Investitionsvolumen oder das Nutzerverhalten, darüber, ob eine energetische Modernisierung den gewünschten Nutzen bringt und wirtschaftlich ist. Vor einer Sanierung sollte daher in jedem Fall eine Energieberatung durchgeführt werden. Im Zuge dieser Beratung werden eine Gebäudebesichtigung durchgeführt und anschließend spezifische Maßnahmen für das Gebäude aufgestellt.

Die vorliegenden Forschungsergebnisse beziehen sich auf die energetische Sanierung eines Bestandswohngebäudes der 1950er bzw. 1960er Jahre. Aufgrund der Ausgestaltung des Gebäudes steht dieser Gebäudetyp für eine Vielzahl von Gebäuden dieser Baualtersklasse, so dass die hier gewonnenen Erkenntnisse durchaus für weitere Gebäude dieses Typs verallgemeinert werden dürfen.

Es kann resümiert werden, dass die Energieverbrauchswerte von den im Vorfeld der Maßnahme berechneten Energiebedarfswerten abweichen. Dieser Sachverhalt ist je nach Sanierungsvariante unterschiedlich stark ausgeprägt. Diese Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch lässt sich nicht allein den Nutzenden zuschreiben, sondern es kommen etliche Faktoren zum Tragen, so auch die nicht korrekt installierte Anlagentechnik. Trotz einer umfangreichen Messtechnik lassen sich die Auswirkungen des Nutzerverhaltens und der Anlagentechnik auf den Energieverbrauch nicht vollständig trennen. Die Analyse der wohnungsspezifischen Daten zeigt, dass das Nutzerverhalten innerhalb einer Sanierungsvariante stark abweichen kann. Dies führt wiederum zu deutlichen Abweichungen gegenüber den normativen Vorgaben (Luftwechsel, Innentemperatur usw.) der EnEV-Berechnungen. Für jede Sanierungsvariante wird hier lediglich eine durchschnittliche Betrachtung des Nutzerverhaltens und seiner Auswirkungen auf den Energieverbrauch ermöglicht (vgl. 6.4).

Im Zuge einer energetischen Modernisierung sollte darauf geachtet werden, dass die anlagentechnische Ausstattung der Wohnungen und des Gebäudes auf die Wünsche der NutzerInnen abgestimmt sind, denn nur so lassen sich die berechneten Energieeinsparungen erzielen. Aus den hier ausgewerteten Befragungen wird ein großer Bedarf an Informationen deutlich, dem nur begegnet werden kann, indem die Nutzer/innen über alle technischen Geräte und ihre Funktionsweise aufgeklärt und kontinuierlich beraten werden. Es liegt auf der Hand: Wenn die Bedienelemente nicht selbsterklärend sind und das Nutzerhandbuch unhandlich, wird die eingebaute Technik nicht zweckdienlich benutzt. Die Folge kann Mieterunzufriedenheit sein, die auch dazu führt, dass die versprochene Energieeinsparung nicht erzielt wird (vgl. 5.3).

Um Nutzern/innen die Möglichkeit zu geben, jederzeit ihr Verbrauchsverhalten zu überprüfen und die Auswirkungen des eigenen Handels zu erkennen, bietet sich eine Visualisierung der Verbrauchsparameter an. Des Weiteren empfiehlt es sich für Vermieter, Mieterinformationsabende und Feedback-Runden anzubieten, um die korrekte Benutzung der verbauten Anlagentechnik wiederholt zu thematisieren. Diese Termine können seitens der Mieter außerdem dazu genutzt werden, mögliche Unzufriedenheit zu äußern. Ergänzend bleibt festzuhalten, dass der Energieverbrauch sinkt, wenn der Nutzende die Funktionsweise der Anlagentechnik versteht und diese bewusst verwendet (vgl. 5.4).

Um die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung zu erreichen, ist eine Effizienzsteigerung der energetischen Modernisierungsmaßnahmen notwendig. Dies umfasst in den meisten Fällen eine komplexe Anlagentechnik, welche fehleranfälliger ist. Im Zuge der Sanierung ein Monitoring zu installieren, ist daher wichtig, um mögliche Fehlerquellen frühzeitig aufdecken und beheben zu können. Nur so kann letztendlich die gewünschte Energieeinsparung erzielt werden.





## 8 Literaturverzeichnis

- Ajzen 1991      Ajzen, I. (1991): The theory of planned behavior. In: Organizational behavior and human decision processes 50 (2), S. 179–211.
- Alcott 2008      Alcott, B. (2008): The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements. London: Earthscan.
- Becker 1965      Becker, G. S. (1965): A Theory of the Allocation of Time. In: The Economic Journal 75 (299), S. 493–517.
- Bittermann & Gollner 2011      Bittermann, W.; Gollner, M. (2011): Modelling of Power Consumption in Private Households in Austria According to Type of Usage. Hg. v. Statistics Austria. Vienna.
- BGR 2014      Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.) (2014): Energiestudie 2014. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen (18). Hannover, Dezember 2014.
- BMWA 2005      Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) (Hrsg.) (2005): Innovation und neue Energietechnologien. Das 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Juli 2005.
- BMWi 2011      Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2011): Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung.
- BMWi 2015a      Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015a): Energiedaten: Gesamtausgabe. Stand: April 2015, <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-grafiken,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- BMWi 2015b      Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015b): Europäische Energiepolitik. URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Europaische-und-internationale-Energiepolitik/europaeische-energie-politik.html> [31.07.15].
- Brännlund et al. 2007      Brännlund, R.; Ghalwash, T.; Nordström, J. (2007): Increased energy efficiency and the rebound effect: Effects on consumption and emissions. In: Energy Economics, 29(1): S. 1–17.
- Brounen et al. 2012      Brounen, D.; Kok, N.; Quigley, J. M. (2012): Residential energy use and conservation: Economics and demographics. In: European Economic Review 56 (5), S. 931–945. DOI: 10.1016/j.euroecorev.2012.02.007.
- Brounen et al. 2013      Brounen, D.; Kok, N.; Quigley, J. M. (2013): Energy literacy, awareness, and conservation behavior of residential households. In: Energy Economics 38, S. 42–50. [DOI: 10.1016/j.eneco.2013.02.008.]
- Cali et al. 2013      Calì, D.; Streblow, R.; Müller, D.; Osterhage, T. (2013): Holistic Renovation and Monitoring of Residential Buildings. In: ECEEE.

- Chitnis et al. 2013 Chitnis, M.; Sorrell, S.; Druckman, A.; Firth, S. K.; Jackson, T. (2013): Turning lights into flights: Estimating direct and indirect rebound effects for UK households. In: Energy Policy 55, S. 234–250. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.12.008.
- Dall'O` et al. 2012 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. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.046.
- Davis 1989 Davis, F. D. (1989): Perceived usefulness, perceived ease of use and user acceptance of information technology. In: Management Information Systems Research Center 13 (3), S. 319–340.
- Die tageszeitung taz 2014 Die tageszeitung (taz) (2014): Hohe Energieeffizienz: So ökologisch wird das neue taz-Haus. Von: Hausblog. URL: <http://blogs.taz.de/hausblog/2014/07/12/so-oekologisch-wird-das-neue-taz-haus/> (31.07.15).
- Die Welt 2014 Die Welt (2014): Deutsche verbrauchen jetzt mehr Energie als zuvor. Von: Wetzel, D. URL: <http://www.welt.de/wirtschaft/energie/article134272198/Deutsche-verbrauchen-jetzt-mehr-Energie-als-zuvor.html> (Zuletzt geprüft 31.07.15), 2014.
- Diener 2009 Diener, E. (2009): The science of well-being. The collected works of Ed Diener. Dordrecht: Springer (The collected works of Ed Diener, vol. 1).
- Erhorn 2007 Erhorn, H. (2007): Bedarf – Verbrauch: Ein Reizthema ohne Ende oder die Chance für sachliche Energieberatung? Hg. v. BuildUp.
- Fokaides et al. 2011 Fokaides, P. A.; Maxoulis, C. N.; Panayiotou, G. P.; Neophytou, M. K.-A.; Kalogirou, S. A. (2011): Comparison between measured and calculated energy performance for dwellings in a summer dominant environment. In: Energy and buildings 43 (11), S. 3099–3105. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.08.005.
- FAZ 2014 Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) (2014): Von 2015 an zahlt das Finanzamt für die neue Heizung. Von: Mihm, A.. URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/staat-beteiligt-sich-ab-2015-an-der-haussanierung-13298948.html> (07.08.15).
- Galvin 2013 Galvin, R. (2013): Targeting 'behavers' rather than behaviours: A 'subject-oriented' approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings.
- Greening et al. 2000 Greening, L. A.; Greene, D. L.; Difiglio, C. (2000): Energy efficiency and consumption –the rebound effect– a survey. In: Energy Policy, 28(6): S. 389–401.
- Haas & Biermayr 2000 Haas, R.; Biermayr, P. (2000): The rebound effect for space heating. Empirical evidence from Austria. In: Energy Policy, 28(6): S. 403–410.
- Haas et al. 1998 Haas, R.; Auer, H.; Biermayr, P. (1998): The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating. In: Energy and Buildings 27 (2), S. 195–205. DOI: 10.1016/S0378-7788(97)00034-0.

- Hastings & Shapiro 2013 Hastings, J. S.; Shapiro, J. M. (2013): Fungibility and Consumer Choice. Evidence From Commodity Price Shocks. In: The Quarterly Journal of Economics 128 (4), S. 1449–1498.
- Heesen & Madlener 2014 Heesen, F.; Madlener, R. (2014). Technology Acceptance as Part of the Behavioral Rebound Effect in Energy Efficient Retrofitted Dwellings, In: FCN Working Paper No. 25/2014, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior, RWTH Aachen University, December.
- Hens 2010 Hens, H. (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. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.030.
- Hens et al. 2010 Hens, H.; Parijs, W.; Deurinck, M. (2010): Energy consumption for heating and rebound effects. In: Energy and buildings 42 (1), S. 105–110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.07.017.
- Hewicker et al. 2011 Hewicker, C.; Hogan, M.; Mogren, A. (2011): Power Perspectives 2030. Full Report.
- Hirst & Brown 1990 Hirst, E.; Brown, M. (1990): Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. In: Resources, Conservation and Recycling 1990 (Volume 3, Issue 4), S. 267–281. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092134499090023W>, zuletzt geprüft am 16.04.2015.
- Hong et al. 2006 Hong, S. H.; Oreszczyn, T.; Ridley, I. (2006): The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings. In: Energy and buildings 38 (10), S. 1171–1181. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.01.007.
- IEA 2014 Internationale Energie Agentur (IEA) (2014) World Energy Outlook 2014.
- ISO 2005 Internationale Organisation für Normung (ISO) 7730 (2005): Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Organization for Standardization.
- Ito 2014 Ito, K. (2014): Do Consumers Respond to Marginal or Average Price? Evidence from Nonlinear Electricity Pricing. In: American Economic Review 104 (2), S. 537–563.
- Jaffe & Stavins 1994 Jaffe, A. B.; Stavins, R. N. (1994): The energy-efficiency gap: What does it mean?. Energy policy, 22(10), 804–810.
- Jenkins et al. 2011 Jenkins, J.; Nordhaus, T.; Shellenberger, M. (2011): Energy Emergence: Rebound and Backfire as Emergent Phenomena. The Breakthrough Institute, Oakland.
- Khazzoom 1980 Khazzoom, D. (1980): Economic implications for mandated efficiency in standards for household appliances. In: The Energy Journal 1(4): S. 21–40.

- Madlener & Alcott 2009 Madlener, R.; Alcott, B. (2009): Energy rebound and economic growth: A review of the main issues and research needs. In: *Energy* 34 (3), S. 370–376. DOI: 10.1016/j.energy.2008.10.011.
- Menezes et al. 2012 Menezes, A. C.; Cripps, A.; Bouchlaghem, D.; Buswell, R. (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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.11.075.
- Neue Züricher Zeitung 2014 Neue Zürcher Zeitung (2014): Energieeffizienz gestern und heute. Von: Humm, O. URL: <http://www.nzz.ch/finanzen/immobilien/energieeffizienz-gestern-und-heute-1.18311096> (Zuletzt geprüft 31.07.15).
- Noll et al. 2008 Noll, H.-H.; Dallinger, G.; Koenig, R.; Willand, I.; Habich, R. (2008): Datenreport 2008. Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Bonn.
- Roy 2000 Roy, J. (2000): The rebound effect: some empirical evidence from India. In: *Energy Policy* 28 (6-7), S. 433–438.
- Saunders 1992 Saunders H. (1992): The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth. In: *Energy Journal* 13 (4): S. 131–148.
- Schipper 1979 Schipper, L. (1979): Another Look at Energy Conservation. In: *The American Economic Review* 69 (2): S. 362–368.
- Schumacher et al. 2003 Schumacher, J.; Klaiberg, A.; Brähler, E. (2003): Diagnostik von Lebensqualität und Wohlbefinden – Eine Einführung. In: *Diagnostische Verfahren zu Lebensqualität und Wohlbefinden*. Göttingen: Hogrefe, S. 9–24.
- Shell 2008 Shell (2008): Shell Energy Scenarios To 2050. Technischer Bericht, Shell International BV.
- Sorrell & Dimitropoulos 2008 Sorrell, S.; Dimitropoulos, J. (2008): The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions. In: *Ecological Economics* 65(2008): S. 636–649.
- Sorrell et al. 2009 Sorrell, S.; Dimitropoulos, J.; Sommerville, M. (2009): Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. In: *Energy Policy* 37 (4): S. 1356–1371.
- Sorrell 2007 Sorrell, S. (2007): The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. Hg. v. UK Energy Research Centre.
- Statistisches Bundesamt 2012 Statistisches Bundesamt (2012): Bauen und Wohnen. Mikrozensus – Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte. Fachserie 5 Heft 1. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Süddeutsche Zeitung 2013 Süddeutsche Zeitung (2013): Der große Verbrauch des kleinen Mannes. Von: Ebitsch, S. URL: <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/energie-sparen-der-grosse-verbrauch-des-kleinen-mannes-1.1826760> (Zuletzt geprüft 31.07.15).
- Thomas & Azevedo 2013 Thomas, B. A.; Azevedo, I. L. (2013): Estimating direct and indirect rebound effects for U.S. households with input-output analysis, Part 1: Theoretic-

cal framework. In: Ecological Economics 86, S. 199–210. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.12.003.

- Turner 2013      Turner, K. (2013): Rebound Effects from Increased Energy Efficiency: A Time to Pause and Reflect. In: The Energy Journal 34 (4). DOI: 10.5547/01956574.34.4.2.
- UBA 2015      Umweltbundesamt (UBA) (2015): Energieverbrauch der privaten Haushalte. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/energieverbrauch-der-privaten-haushalte> [Zuletzt geprüft 10.08.15].
- Varian 1992      Varian, H. (1992). Microeconomics. J. Eatwell, M. Milgate, and P. Newman, The New Palgrave, 3, 461–463.
- Virote &  
Neves-Silva 2012      Virote, J.; Neves-Silva, R. (2012): Stochastic models for building energy prediction based on occupant behavior assessment. In: Energy and buildings 53, S. 183–193. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.06.001.
- Warr et al. 2010      Warr, B.; Ayres, R.; Eisenmenger, N.; Krausmann, F.; Schandl, H. (2010): Energy use and economic development: A comparative analysis of useful work supply in Austria, Japan, the United Kingdom and the US during 100 years of economic growth. In: Ecological Economics, 69 (10): S. 1904–1917.



## Die Autoren

### **Davide Calì**

Davide Calì absolvierte sein Maschinenbaustudium (M.Sc.) an der Universität Catania (Italien) im Juli 2008. Als wissenschaftliche Hilfskraft begann er im Januar 2008 am Fraunhofer ISE, Freiburg, zu arbeiten, wo er auch seine Masterarbeit schrieb. Im Januar 2009 kam er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH Aachen University und promovierte dort zurzeit. In seiner Forschung befasst er sich hauptsächlich mit Gebäudesanierung, Energieversorgungssystemen für Gebäude, Rebound-Effect und der Analyse sowie Modellierung von Nutzerverhalten in Gebäuden.

### **Florian Heesen**

Florian Heesen, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior. Seine akademische Ausbildung hat er mit einem B.Sc. in Volkswirtschaftslehre (2006-2009) an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn begonnen und danach mit einem M.Sc. in International Business/Betriebswirtschaftslehre (2010-2012) der RWTH Aachen University abgeschlossen. Seit 2013 arbeitet er unter Professor Dr. Reinhard Madlener an einem Projekt zum Nutzerverhalten in energiesanierten Wohngebäuden. Hierbei fokussiert er sich wesentlich auf die mikroökonomischen Grundlagen der Haushalts-Produktion-Konsum-Theorie und versucht, die durch das Forschungsprojekt in der Realität beobachteten Phänomene mit der mikroökonomischen Theorie in Einklang zu bringen.

### **Tanja Osterhage**

Nach dem Studium der Architektur (Diplom 2004) hat Dipl.-Ing. Tanja Osterhage als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich der Lehre bis August 2008 an der Universität Dortmund, Fakultät Bauwesen, am Lehrstuhl für Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung gearbeitet. Seit September 2008 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich der Forschung am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH Aachen University. Tanja Osterhage ist als Architektin sowie staatlich anerkannte Sachverständige für den Schall- und Wärmeschutz zugelassen und zudem bafa-Energieberaterin.

### **Rita Streblow**

Nach dem Studium der Gebäudetechnik an der Technischen Universität Berlin arbeitete Dr.-Ing. Rita Streblow von 2003–2007 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Hermann-Rietschel-Institut der Technischen Universität Berlin. 2007 wechselte sie an die RWTH Aachen und wurde Oberingenieurin am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik. Seit ihrer Promotion 2011 an der RWTH Aachen beschäftigt sie sich als Post-Doc mit urbanen Energiesystemen und der Optimierung von Gebäudeenergiesystemen.



### **Reinhard Madlener**

Univ.-Prof. Dr. Reinhard Madlener, geb. 1964 in Dornbirn (Österreich), hat an der WU Wien und am Institut für Höhere Studien in Wien VWL und BWL studiert. Nach seiner Promotion in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften im Jahre 1996 war er am ESRC Macroeconomic Modelling Bureau, University of Warwick (wiss. Mitarbeiter), Joanneum Research (wiss. Mitarbeiter), dem Institut für Höhere Studien Kärnten (Direktor) und dem Center for Energy Policy and Economics, ETH Zürich (Oberassistent) tätig. Anfang 2007 wurde er an die RWTH Aachen berufen (Professur für Wirtschaftswissenschaften, insbes. Energieökonomik), wo er das von ihm gegründete Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) leitet. In den letzten 20 Jahren hat er zahlreiche Publikationen in hochrangigen internationalen Fachzeitschriften realisiert. Professor Madlener sitzt in den Herausgebergremien und Fachbeiräten mehrerer internationaler Energie-Fachzeitschriften (so u. a. Applied Economics Quarterly, Applied Energy, Energy, Energy Efficiency, Energy Policy, International Journal of Energy Sector Management und Sustainable Cities and Society). Seine Hauptforschungsinteressen liegen in den Bereichen Energieökonomik, Energiepolitik, zeitliche und räumliche Technologieinnovation und -diffusion, Wirtschaftlichkeit nachhaltiger Energiesysteme sowie Investitionsentscheidungen unter Risiko bzw. Unsicherheit.

### **Dirk Müller**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller, Jahrgang 1968, begann seine wissenschaftliche Laufbahn nach seinem Maschinenbaustudium an der RWTH Aachen und dem Bachelor of Engineering des Dartmouth College in Hanover/N.H., USA. Nach seiner Promotion an der RWTH Aachen am Lehrstuhl Wärmeübertragung und Klimatechnik war er bei der Robert Bosch GmbH im Zentralbereich Forschung und Vorausbildung und anschließend bei der Behr GmbH als Prozessleiter für Simulationsverfahren tätig. Im Jahr 2003 wurde er als Universitätsprofessor an die TU Berlin berufen und war bis 2007 Leiter des Hermann-Rietschel-Instituts sowie Obmann des Studiengangs „Gebäudetechnik“. 2007 folgte er dem Ruf der RWTH Aachen und ist seitdem Leiter des Instituts für Gebäude- und Raumklimatechnik an der RWTH Aachen. Von 2011 bis 2015 übernahm Dirk Müller neben seiner Tätigkeit an der RWTH Aachen die technische Geschäftsführung der TROX GmbH.

ISBN 978-3-8167-9633-6



Fraunhofer IRB  Verlag