



**Institut Wohnen und Umwelt GmbH  
Rheinstraße 65  
64295 Darmstadt**

**Auftraggeber KfW Bankengruppe**

**Gutachten Erhebung von Energieverbräuchen  
und Analyse von Energiebilanzen  
im Rahmen der Programme „Energieeffizient  
Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“**

*Autoren:*

**Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt**

Nikolaus Diefenbach  
Tobias Loga  
Kornelia Müller

**17. Juni 2019**



## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>1 Einleitung</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>2 Stand der Forschung: Empirische Studien zum Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser bei Wohngebäuden</b> ..... | <b>11</b> |
| <b>3 Durchführung der Erhebung und der Analysen</b> .....   | <b>19</b> |
| 3.1 Elektronischer Fragebogen .....   | 19        |
| 3.2 Erhebungskonzept und Phasen der Erhebung .....  | 20        |
| 3.3 Ansätze für die Datenanalyse.....   | 21        |
| <b>4 Untersuchung von gemessenen und berechneten Energieverbräuchen im Wohngebäudebestand</b> .....                     | <b>24</b> |
| 4.1 Endenergieverbräuche im Überblick .....   | 24        |
| 4.2 Analyse des SEP-Verfahrens .....  | 25        |
| 4.3 Analyse des Verfahrens gemäß Energieeinsparverordnung / Energieausweis.....   | 32        |
| <b>5 Untersuchung von gemessenen und berechneten Energieverbräuchen im Neubau</b> .....                                 | <b>39</b> |
| 5.1 Endenergieverbräuche im Überblick .....   | 39        |
| 5.2 Anpassung der Ansätze zum elektrischen Hilfsenergiebedarf.....  | 40        |
| 5.3 Analyse von berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch.....  | 41        |
| 5.4 Vergleich von berechneten und gemessenen Primärenergiekennwerten.....   | 44        |
| <b>6 Untersuchungen mit dem TABULA-Verfahren (Bestand und Neubau)</b> .....   | <b>48</b> |
| 6.1 Hintergrund zum TABULA-Energiebilanzverfahren.....  | 48        |
| 6.2 Standardansätze und Abkürzungen für die Darstellung der Ergebnisse .....  | 48        |
| 6.3 Überblick über die Daten zum Verbrauch und zum Bedarf.....  | 49        |
| 6.4 Überblick über den Zusammenhang zwischen Verbrauchs- und Bedarfskennwerten .....                                    | 56        |
| 6.5 Nach Energiebedarf differenzierte Vergleichswerte („Benchmark-Tabelle“).....  | 58        |
| 6.6 Ermittlung einer Funktion zur Kalibrierung der Standardberechnung auf das typische Verbrauchsniveau .....           | 64        |
| <b>7 Auswertung der Angaben zum Nutzerverhalten in den Einfamilienhäusern</b> .....                                     | <b>72</b> |
| 7.1 Übersicht über die Angaben und Differenzierung nach energetischer Qualität der Gebäudehülle .....                   | 72        |
| 7.2 Zusammenhang zwischen angegebener Nutzung und Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis .....                                   | 77        |
| <b>Anhang: Überblick über die verwendeten Bezugsgrößen</b> .....  | <b>81</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b> .....   | <b>84</b> |



## Zusammenfassung

Verschiedene Studien zeigen, dass übliche Energiebilanzverfahren für Wohngebäude die in der Praxis tatsächlich erreichten Energieverbräuche im Durchschnitt nicht richtig abbilden. Dies gilt insbesondere für Bestandsgebäude mit geringer Energieeffizienz und tatsächlich auch hohen Verbräuchen, die aber durch die Berechnungsansätze noch überschätzt werden. Im Zuge des vorliegenden Projekts wurden entsprechende nationale und internationale Untersuchungen dokumentiert, die auf eigenständigen empirischen Quellen aufbauen. Hierbei zeigte sich, dass Diskrepanzen zwischen berechneten und tatsächlich gemessenen Energiekennwerten sowohl bei den in Deutschland genutzten Bilanzmethoden, insbesondere dem Verfahren der Energieeinsparverordnung (EnEV), als auch in verschiedenen europäischen Ländern auftreten.

Vor diesem Hintergrund wurde – als Zusatzbaustein zu dem jährlichen Monitoring der Förderprogramme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ – die vorliegende Untersuchung durchgeführt. Sie hatte das Ziel, das generelle Phänomen der Abweichungen von berechnetem Energiebedarf und tatsächlichem Energieverbrauch durch eine neue, für diesen Zweck konzipierte Gebäude- und Energieverbrauchsstichprobe detailliert zu untersuchen, die beim Monitoring der Programme angewendeten Bilanzmethoden entsprechend weiterzuentwickeln und einen Vergleich mit dem bei EnEV/Energieausweis angewendeten Verfahren herzustellen.

Die Stichprobenerhebung wurde in Form einer Internetbefragung durchgeführt. Befragt wurden Fördermittelempfänger der Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“. Im Fall von modernisierten Gebäuden und Neubauten wurden dabei Förderfälle der Jahre 2010/2011 berücksichtigt: Hier liegen die Maßnahmen weit genug zurück, so dass über mehrere Jahre hinweg Energieverbräuche bekannt sind. Außerdem wurden Fördermittelempfänger des Jahres 2016 bezüglich ihres Gebäudes im unmodernisierten Zustand, also vor Durchführung der geförderten Maßnahmen, befragt. Bei der Befragung wurden je nach Fördermaßnahme bzw. Förderstandard unterschiedliche Teilmengen berücksichtigt, so dass ein breites Spektrum unterschiedlicher Gebäude und Maßnahmen abgedeckt wird – vom quasi unmodernisierten Bestandsgebäude bis hin zu den besten Effizienzhausstandards.

Bei der Interneterhebung wurden sowohl der Energieverbrauch als auch die für die Energieeffizienz relevanten Merkmale des Gebäudes und des Wärmeversorgungssystems erhoben. Ziel war es, detaillierte und gleichzeitig zuverlässige Informationen zu erhalten. Der Fragebogen wurde entsprechend umfangreich konzipiert und umfasste rund 170 Einzelfragen bzw. Hinweisseiten. Auch Besonderheiten der Nutzung, wie zum Beispiel längere Leerstands- und Abwesenheitszeiten, wurden berücksichtigt. Gleichzeitig wurden die Möglichkeiten eines elektronischen Fragebogens ausgenutzt: Durch automatische Menüführung wurden die Befragten über Verzweigungen und Sprünge nur zu den sie betreffenden Fragen geleitet. Einfache automatisierte Plausibilitätstests wurden bereits während der Befragung eingesetzt.

Die Erhebung wurde im Jahr 2017 in zwei Pilotphasen und einer Hauptphase durchgeführt. Insgesamt konnten 1687 regulär ausgefüllte Fragebögen gewonnen werden, und zwar 461 Bestandsgebäude vor Modernisierung, 631 Bestandsgebäude nach Modernisierung und 595 Neubauten. Durch weitere Plausibilitätstests wurde die Zahl der auswertbaren Fälle in den einzelnen Untersuchungen noch deutlich eingeschränkt.

Analysiert wurde zunächst das beim jährlichen Monitoring des Programms „Energieeffizient Sanieren“ verwendete Energiebilanzverfahren des IWU (Bezeichnung: „SEP-Verfahren“). Dieses Verfahren berücksichtigt gegenüber anderen Berechnungsmethoden bereits Ansätze, die einer Überschätzung des Energieverbrauchs unmodernisierter Gebäude entgegenwirken. Dennoch bestand die Vermutung, dass immer noch systematische Abweichungen zu den tatsächlichen Energieverbräuchen bestehen und eine weitergehende Anpassung daher notwendig wäre.

Diese Einschätzung wurde durch die Auswertung der empirischen Daten für die Bestandsgebäude bestätigt. Durch Regressionsanalyse wurde eine Anpassungsfunktion ermittelt, die bei zukünftigen Anwendungen zur Kalibrierung des Verfahrens an das tatsächliche Energieverbrauchsniveau genutzt werden kann.

Anschließend wurde das beim Monitoring angewendete SEP-Verfahren mit dem Verfahren nach EnEV/Energieausweis bei Bestandsgebäuden verglichen (DIN V 4108-6 / 4701-10). Diese Untersuchung fand parallel auf unterschiedlichen Wegen statt: Zum ersten wurden die Berechnungsmethoden im Hinblick auf ihre Randbedingungen und Eingangsparameter direkt miteinander verglichen. Zum zweiten wurde die mit dem SEP-Verfahren durchgeführte Anpassungsrechnung noch einmal wiederholt, nachdem zuvor aber die Randbedingungen an das EnEV-Verfahren angepasst wurden. Wie im SEP-Verfahren basieren dabei die Ansätze zu den Gebäude-Bauteilflächen auf vereinfachten Annahmen. Und zum dritten wurden diejenigen Bestandsgebäude der Stichprobe ausgewertet, bei denen berechnete Energiekennwerte aus dem Energiebedarfsausweis vorlagen, die dann über eine entsprechende Anpassungsrechnung direkt mit den Energieverbräuchen verglichen werden konnten. Auf allen drei Wegen konnte – wenn auch im Ausmaß nicht völlig identisch – gezeigt werden, dass das Verfahren nach EnEV den Energieverbrauch insbesondere wenig modernisierter Gebäude noch stärker überschätzt als das beim Monitoring im Programm „Energieeffizient Sanieren“ angewendete SEP-Verfahren.

Abgesehen von dem Korrektur- bzw. Kalibrierungsbedarf der jeweiligen Verfahren ist aber auch festzuhalten, dass die Energiebilanzberechnung für Wohngebäude im Bestand grundsätzlich in die richtige Richtung weist: Je geringer der rechnerische Energieverbrauch (also je besser der Energieeffizienzstandard) desto geringer ist im Durchschnitt auch der tatsächliche Energieverbrauch. Die beobachteten Verbrauchsunterschiede zwischen unmodernisierten Gebäuden und den besten Effizienzhausstandards sind auch in der Praxis sehr groß. Die Möglichkeiten der Energieeinsparung durch Wärmeschutz, effizientere Wärmeversorgung und die Verwendung regenerativer Energien werden also durch die empirischen Daten belegt und bestätigt. Insbesondere zeigt sich, dass im Bereich hoher Energieeffizienzstandards die berechneten niedrigen Energiebedarfswerte durch die gemessenen Verbräuche im Durchschnitt tatsächlich erreicht bzw. sogar noch etwas unterschritten werden.

Auch für den Neubau wurden entsprechende Analysen zum Vergleich von gemessenen und berechneten Energiekennwerten durchgeführt. Das beim Monitoring des Programms „Energieeffizient Bauen“ vom IWU eingesetzte Verfahren verwendet anders als im Bestand keine eigenständige Berechnungsmethode auf Basis von Gebäudemerkmalen und Anlagentechnik. Vielmehr wird direkt auf Angaben des Energiebedarfsausweises zurückgegriffen, so dass hier in der Untersuchung weitgehend ein direkter Vergleich von Energieausweisdaten (die auf dem EnEV-Verfahren beruhen) mit den gemessenen Energieverbräuchen durchgeführt wurde. Es zeigte sich, dass über die gesamte Stichprobe betrachtet die Energieverbräuche die berechneten Energiebedarfswerte zwar leicht überschreiten, im Großen und Ganzen aber eine befriedigende Übereinstimmung besteht und insbesondere kein Hinweis auf eine Überschätzung von Energieeinsparungen der geförderten KfW-Effizienzhausstandards gegenüber dem EnEV-Standard vorliegt. Auf die Ableitung einer Kalibrierungsfunktion wurde daher verzichtet: Diese hätte keine wesentlichen Korrekturen mit sich gebracht, angesichts der begrenzten auswertbaren Stichprobenzahl aber eine relativ hohe Ungenauigkeit aufgewiesen.

Darüber hinaus wurden für die Neubaufälle die Primärenergiekennwerte, die für die Einhaltung der Effizienzhausstandards maßgeblich sind, gesondert untersucht. Zum Vergleich mit den berechneten Primärenergiebedarfswerten wurde der beim Betrieb der Gebäude aufgetretene Primärenergieverbrauch auf Basis der gemessenen Verbräuche der jeweiligen Energieträger ermittelt. Dabei zeigte sich, dass die rechnerischen Primärenergie-Zielvorgaben für die jeweiligen Effizienzhausstandards auch in der Praxis, also mit dem späteren Primärenergieverbrauch der geförderten Gebäude, ungefähr erreicht werden.

Schließlich wurde mit Hilfe der Stichprobenerhebung für Neubau und Bestand noch ein Energiebilanzverfahren untersucht, das vom IWU im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts TABULA entwickelt wurde. Es handelt sich um eine Weiterentwicklung des oben genannten SEP-Verfahrens und soll zukünftig bei Analysen und Monitoringuntersuchungen des IWU im Wohngebäudebestand verstärkt zum Einsatz kommen. Auch für dieses Verfahren wurden Anpassungsfunktionen für den Abgleich der Berechnung an die tatsächlichen Verbräuche abgeleitet, mit denen bisherige Kalibrierungsansätze ersetzt werden können.

Als Ursache für die in dieser und weiteren Untersuchungen beobachteten Abweichungen von berechnetem und gemessenem Energieverbrauch wird häufig der sogenannte Rebound-Effekt ins Spiel gebracht: Demnach besteht die Vermutung, dass sich Bewohner in gut gedämmten Gebäuden wegen der niedrigeren Heizkosten weniger energiesparend verhalten. Vor diesem Hintergrund wurden auch die Angaben zur Gebäudenutzung aus der aktuellen Untersuchung ausgewertet. Tatsächlich liegen die von den Nutzern genannten Innentemperaturen in beheizten Räumen gut gedämmter Gebäude über denen in schlechter gedämmten Häusern, allerdings nur in geringem Maße (weniger als 1 Grad). Auch wird in gut gedämmten Häusern seltener eine Nachtabsenkung durchgeführt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese bei sehr gutem Wärmeschutz schon allein physikalisch bedingt einen geringeren Effekt hat: Die Temperaturen sinken deutlich weniger ab als in schlecht gedämmten Gebäuden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass das SEP-Verfahren in seinen Ansätzen bereits höhere Innentemperaturen bei gutem Wärmeschutz verwendet hat und hier dennoch ein erheblicher Kalibrierungsbedarf identifiziert wurde.

Vor diesem Hintergrund ist festzuhalten, dass der Rebound-Effekt zwar möglicherweise zu den beobachteten Diskrepanzen von berechneten und gemessenen Energiekennwerten beiträgt, diese aber nur zu einem geringeren Anteil erklären kann. Andere mögliche Einflussfaktoren wie beispielsweise die in den Berechnungsverfahren verwendeten Standardansätze für Materialkennwerte ungedämmter Gebäudebauteile oder die Ansätze für die Wärmeverluste der Anlagentechnik kommen hier ebenfalls in Betracht. Weitere Untersuchungen zur genaueren Klärung dieser Fragen wären daher anzustreben.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit der Studie umfassende empirische Daten zu den theoretisch berechneten Energiebedarfen und den tatsächlichen Energieverbräuchen bei der Wärmeversorgung in deutschen Wohngebäuden gewonnen wurden. Im Rahmen einer bundesweiten Erhebung wurden hierfür ca. 30.000 Hauseigentümer angeschrieben, die in den letzten Jahren entsprechende Maßnahmen durchgeführt haben. Mit 1.687 regulär ausgefüllten Fragebögen zählt die Studie zu den umfangreichsten Analysen in Deutschland zu diesem Themenfeld. Insgesamt macht die Studie Folgendes deutlich:

- Ein Literaturüberblick zeigt, dass der auf Basis von Modellrechnungen ermittelte Energiebedarf den tatsächlichen Energieverbrauch insbesondere bei unmodernisierten Bestandsgebäuden in der Regel überschätzt, sowohl im nationalen als auch im internationalen Kontext.
- Bei den in dieser Studie betrachteten Neubauten ist im Mittel eine weitgehende Übereinstimmung zwischen dem rechnerisch auf Basis der Energieausweisdaten ermittelten Energiebedarf und dem tatsächlichen Energieverbrauch gegeben, auch im Hinblick auf den Einsatz von Primärenergie.
- Bei den in dieser Studie betrachteten Bestandsgebäuden gibt es im Mittel eine Abweichung zwischen dem berechnetem Bedarf und dem tatsächlichen Verbrauch. Diese Abweichung fällt sowohl bei der Betrachtung von Energieausweisen als auch bei einer Berechnung nach EnEV-Vorgaben größer aus als beim SEP-Verfahren, das beim Monitoring der Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ verwendet wurde und bereits entsprechende Korrekturen enthält.
- Hintergründe der Abweichungen konnten nicht untersucht werden. Hier ist unter anderem an die Annahmen zur Raumtemperatur, an die Materialkennwerte ungedämmter Gebäude sowie an die Ansätze für die Wärmeverluste der Anlagentechnik zu denken. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die ordnungsrechtlich im Rahmen von EnEV und Energieausweisen zugelassenen Berechnungsverfahren (DIN V 18599 und DIN V 4701/10 in Verbindung mit DIN V 4108-6) nicht für die Ermittlung realer Energieverbräuche angelegt sind. Die Verfahren basieren auf der Annahme standardisierter Nutzungsparameter, die von den realen Bedingungen deutlich abweichen können. Insbesondere trifft das auf energetisch nicht sanierte Bestandsgebäude zu.
- Generell lässt sich aus den empirischen Ergebnissen dieser Studie die Schlussfolgerung ableiten, dass bei Gebäuden mit hoher Energieeffizienz sowohl im Bestand als auch im Neubau die von den betrachteten Berechnungsverfahren ausgewiesenen Energiebedarfswerte in der Realität auch durch die gemessenen Verbräuche im Mittel ungefähr erreicht werden.



# 1 Einleitung

Der vorliegende Bericht fasst die Endergebnisse einer Untersuchung zusammen, die als Zusatzbaustein im Rahmen des Projekts „Fortführung des Monitorings der KfW-Programme ‚Energieeffizient Bauen und Sanieren (EBS)‘ 2015-2018“ durchgeführt wurde<sup>1</sup>. In diesem Zusatzbaustein mit dem Titel „Verbrauchserhebung und Fortentwicklung des Bilanzmodells“ wurde im Rahmen einer Interneterhebung eine umfangreiche Stichprobe von Fördermittelempfängern im Bestand und Neubau befragt. Dabei wurden gleichzeitig der Energieverbrauch sowie für die Energieeffizienz relevante Merkmale des jeweiligen Gebäudes bzw. Wärmeversorgungssystems erhoben. Auf diese Weise konnten die Zusammenhänge zwischen den tatsächlich erreichten Energieverbräuchen und den aus den Merkmalen abgeleiteten, theoretisch berechneten Energiebedarfswerten analysiert werden. Ziel war insbesondere die Untersuchung von Diskrepanzen zwischen Energieverbrauch und Energiebedarf, die offenbar bei gängigen Energiebilanzmethoden für den Wohngebäudebestand generell auftreten – insbesondere auch bei dem im Rahmen von Energieeinsparverordnung (EnEV) und Energieausweiserstellung verwendeten „offiziellen“ Verfahren. Darüber hinaus bestand das Ziel in der Fortentwicklung bzw. Kalibrierung der beim Monitoring verwendeten Energiebilanzverfahren, so dass diese die tatsächlichen Energieverbräuche im Durchschnitt besser wiedergeben können<sup>2</sup>.

Im folgenden Kapitel 2 wird der Stand der Forschung bezüglich von Abweichungen zwischen Energiebilanzberechnungen und den tatsächlich gemessenen Energieverbräuchen dargestellt. Es werden nationale und internationale Studien mit eigenständigen empirischen Datenquellen dokumentiert.

Kapitel 3 beschreibt die Durchführung der Erhebung im vorliegenden Projekt und die Grundsätze der Analyse. Insbesondere werden der bei der Internetbefragung verwendete „elektronische“ Fragebogen, das Konzept und die Realisierung der Stichprobenerhebung und das grundsätzliche Vorgehen bei der Analyse dargestellt.

Die Durchführung der Analyse der Stichprobendaten für Bestands-Wohngebäude vor und nach der Durchführung von energetischen Modernisierungsmaßnahmen ist in Kapitel 4 beschrieben. Dabei wird zunächst das beim Monitoring des Programms „Energieeffizient Sanieren“ verwendete Verfahren untersucht. Diese vom IWU entwickelte Energiebilanzmethode wird mit dem Kürzel „SEP“ bzw. „SEP 2007“ bezeichnet<sup>3</sup>. Durch Anwendung der Regressionsanalyse wird eine Anpassungsfunktion an reale Verbräuche abgeleitet. In den weiteren Abschnitten des Kapitels findet ein Vergleich mit dem Verfahren nach EnEV bzw. Energieausweis statt.

In Kapitel 5 sind entsprechende Analysen für die Neubauten der Stichprobe dokumentiert, die im Programm „Energieeffizient Bauen“ gefördert wurden. Die beim Monitoring des Programms verwendeten Energiebedarfswerte werden nicht wie im Altbau nach einem eigenständigen Bilanzverfahren aus Gebäudemerkmalen ermittelt, sondern aus Angaben im Energieausweis abgeleitet. Das Monitoring-Bilanzverfahren greift hier also direkt auf Ergebnisse des offiziellen Verfahrens nach EnEV/Energieausweis zurück, so dass eine Unterscheidung der Verfahren bei den Neubau-Untersuchungen nicht sinnvoll bzw. möglich ist.

---

<sup>1</sup> Das Monitoring der Programme wurde vom Institut Wohnen und Umwelt gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut IFAM in Bremen (Abteilung Energiesystemanalyse) in aufeinander folgenden Projekten seit den Förderjahren 2005/2006 (damals für das KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm) durchgeführt und in zwölf jährlichen Monitoringberichten dokumentiert, siehe <https://www.iwu.de/forschung/energie/laufend/monitoring-der-kfw-energiesparprogramme/>

<sup>2</sup> Energieverbrauchs- und Energiebedarfswerte sind in der Studie auf die Wohnfläche bzw. auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$  bezogen. Außerdem ist bei Brennstoffen der Bezug auf den Brennwert bzw. Heizwert zu unterscheiden. Im Anhang wird ein Überblick über die jeweils verwendeten Bezugsgrößen gegeben.

<sup>3</sup> Diese IWU-interne Abkürzung steht für „Simplified Energy Profile“.

Kapitel 6 dokumentiert weitere Analysen von Energieverbrauch und Energiebedarf, die gemeinsam für die Neubauten und Bestandsgebäude der Stichprobe auf Basis der TABULA-Energiebilanzmethode durchgeführt wurden. Dieses Verfahren wurde vom IWU in dem gleichnamigen europäischen Forschungsprojekt entwickelt und soll in zukünftigen Untersuchungen und Projekten des IWU die Grundlage für die energetische Bilanzierung von Wohngebäudebeständen und entsprechende Monitoringuntersuchungen bilden.

In Kapitel 7 sind Angaben zum Nutzerverhalten dokumentiert, die im Rahmen der Internetbefragung insbesondere zur Plausibilisierung und Interpretation der Verbrauchswerte mit erhoben wurden.

## **2 Stand der Forschung: Empirische Studien zum Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser bei Wohngebäuden**

Es gibt eine Vielzahl von Studien, die sich mit dem Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser von Wohngebäuden in Deutschland befassen. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Untersuchungen in diesem Bereich gegeben, wobei eine Differenzierung entsprechend der Art des Datenzugangs vorgenommen wird.

Für die weitere Auswertung werden dann diejenigen Datenquellen noch einmal gesondert betrachtet, die für eine Analyse der Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der energetischen Qualität und insbesondere vom berechneten Energiebedarf geeignet erscheinen. Hier handelt es sich also um Fälle, in denen nicht nur die Verbrauchsdaten, sondern auch Berechnungsergebnisse zum Energiebedarf vorliegen. Diese Datenquellen sind weiter unten in Tabelle 1 zusammenfassend dokumentiert.

- **Auswertung von Modell- und Demonstrationsprojekten**

Es liegt eine Vielzahl von Auswertungen des Zustands und des Verbrauchs für energieeffiziente Gebäude vor, die im Rahmen von Modell- und Demonstrationsvorhaben messtechnisch und wissenschaftlich begleitet wurden. Beispiele sind die Metaanalysen des IWU von verschiedenen Forschungsprojekten [Loga et al. 2003] (inzwischen recht veraltet) oder die aktuelleren Studien des IBP [Erhorn/Bergmann 2015] für Gebäude mit Elektrowärmepumpen oder der AGES zu Energieeffizienzstandards, die durch eine eigene Erhebung bei Gebäudeeigentümern und Planern ergänzt wurde [Zeine et al. 2015]. Da die Nutzung der Gebäude und der Betrieb der Anlagentechnik unter Beobachtung der Forscher stattfindet, die ggf. Optimierungsmaßnahmen veranlasst haben und – zumindest bei den selbstnutzenden Eigentümern auf Grund der Entscheidung für ein besonders energieeffizientes Gebäude – evtl. von einer nicht ganz repräsentativen Nutzung auszugehen ist, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Breite nicht unbedingt gewährleistet. Zumindest zeigen diese Studien aber, welche Verbrauchswerte unter günstigen Umständen (motivierte Bewohner, Qualitätssicherung der Umsetzung, Monitoring der Betriebsführung) erreichbar sind.

- **Auswertung von Datenbanken aus Energieberatungs- oder Qualifizierungskampagnen**

Im Kontext von Energieberatungsaktionen oder Qualifizierungsmaßnahmen wurden in der Vergangenheit von Experten aufgenommene Gebäudedaten und zugehörige Energieverbrauchswerte zusammengeführt (z. B. in [Gruber et al. 2005], [Knissel et al. 2006], [Jagnow et al. 2007]). Hintergrund ist die gängige Praxis in der Energieberatung, bei der Prognose von durch Maßnahmen erzielbaren Einsparungen von dem vorliegenden Energieverbrauchswert des Gebäudes auszugehen. Aus systematischen Gründen sind in diesen Datensammlungen tendenziell eher unmodernisierte Gebäude enthalten. Dennoch liefern diese Studien erste Anhaltspunkte für den Abgleich des Normenergiebedarfs mit dem mittleren Energieverbrauch. Ein Problem stellt jedoch die mangelnde Aktualität der Daten dar, denn die zu Grunde liegenden Erhebungen liegen inzwischen schon 10 bis 15 Jahre zurück.

- **Durchführung von Erhebungen zum Verbrauch bei Eigentümern energieeffizienter Gebäude**

Auch Erhebungen bei Gebäudeeigentümern sowie bei Architekten und Fachplanern wurden in der Vergangenheit durchgeführt. Beispielhaft sei hier die Nacherhebung bei Effizienzhäusern der dena für Wohngebäude mit Kesseln und Elektrowärmepumpen [Bigalke et al. 2016] oder

eine Masterarbeit an der TU Darmstadt zum Verbrauch modernisierter Mehrfamilienhäuser [Graf 2016] genannt.

- **Auswertung der Datenbanken von Messdienstleistern**

Wenn Daten für eine große Anzahl von Gebäuden durch Befragung der Hauseigentümer gewonnen werden, erweist sich insbesondere auch die Erhebung des Energieverbrauchs an vielen Stellen als fehleranfällig. Besser sieht dies bei der Auswertung von Datenbanken von Messdienstleistern im Mietwohngebäudebereich aus (z. B. [Techem 2016]). Auf Grund der Nutzung für die Heizkostenabrechnung im jährlichen Turnus ist hier ein zusätzliches qualitätssicherndes Element enthalten. Bezüglich der Datenqualität der Verbrauchsdaten können die veröffentlichten Auswertungen somit sicherlich als empirisch sehr belastbar angesehen werden. Allerdings spielt im Abrechnungsprozess die energetische Qualität der Gebäude keine Rolle, so dass diese Informationen nicht erhoben werden und ein Zusammenhang der Verbrauchsdaten mit dem energetischen Zustand nicht hergestellt werden kann.

- **Auswertung von Energieverbrauchsausweis-Daten**

Die bei der Erstellung von Energieverbrauchsausweisen erhobenen Daten stellen eine weitere wichtige Quelle dar, da neben dem Verbrauch auch in der Regel Angaben zum energetischen Zustand des Gebäudes abgefragt werden. Diese werden für die Ausgabe der im Energieverbrauchsausweis vorgeschriebenen Modernisierungsempfehlungen verwendet. Zum Beispiel werden in [Schröder et al. 2009] und in [Fisch et al. 2012] auf der Basis dieser Daten Verbrauchsdaten verschiedenen Kategorien des energetischen Zustands zugeordnet. Ein grundsätzliches Problem stellt allerdings die Tatsache dar, dass der Energieverbrauchsausweis tendenziell weder bei modernisierten Objekten noch bei Neubauten ausgestellt wird, da hier ja ein Energiebedarfsausweis vorhanden sein sollte. Es muss daher die Frage gestellt werden, ob die in der Datenbank enthaltenen Gebäude mit hohem energetischen Standard evtl. Besonderheiten aufweisen. Hinzu kommt, dass in der Vergangenheit in den Fragebögen die Abfragen zur energetischen Qualität nicht ausreichend differenziert oder unvollständig waren, so dass die sichere Einordnung entsprechend dem energetischen Gebäudezustand zumindest für die besten Klassen fragwürdig ist (vgl. [Loga et al. 2018]).

- **Kombination von Energiebedarfs- und Energieverbrauchsausweis**

Ein vielversprechender Ansatz für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Normenergiebedarf und Energieverbrauch ist die Berichtspflicht für den Energieverbrauch als nachträgliche Ergänzung des Energiebedarfsausweises. Ein solches Verfahren wurde in Luxemburg auf der Basis des 2014 eingeführten Energiepassregisters umgesetzt. Gemäß der gesetzlichen Regelung [PE-Lux 2007] ist im Fall der Erstellung eines Energiepasses für ein bestehendes Gebäude neben dem berechneten Energiebedarf auch der gemessene Verbrauch mit anzugeben. Bei einem neu zu errichtenden Gebäude ist der Energiepass spätestens nach vier Jahren um den gemessenen Verbrauchswert zu ergänzen. Ende 2015 umfasste die Datenbank etwa 20.000 Energiepässe, für mehr als 4000 dieser Datensätze konnte der Zusammenhang zwischen Verbrauch und Bedarf ermittelt werden [Hörner et al. 2016].

Die Kenndaten und bezüglich des Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnisses entscheidenden Diagramme verschiedener Studien, in denen sowohl berechnete Energiebedarfs- als auch gemessene Energieverbrauchswerte vorlagen, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

**Tabelle 1 Überblick über Ergebnisse von verschiedenen Studien zum Zusammenhang zwischen gemessenem Energieverbrauch und berechnetem Energiebedarf bei Wohngebäuden**

|   | <u>Studien zu Neubauten</u> |
|---|-----------------------------|
| <p>1 <b>Meta-Analyse verschiedener Modellprojekten des energiesparenden Bauens durch IWU</b></p> <p>Diagramm: Zusammenhang zwischen Heizwärmeverbrauch und Heizwärmebedarf</p> <p>Neubauten<br/>n = 91<br/>Quelle: [Loga et al. 2003]</p>   |                             |
| <p>2 <b>Auswertung des Verbrauchs von Modellvorhaben mit Effizienzhaus-Plus-Standard und Elektrowärmepumpen</b></p> <p>Diagramm: Gegenüberstellung des Endenergiebedarfs (oberer Balken) und des Endenergieverbrauchs (unterer Balken) für Heizung und Warmwasser</p> <p>Der über alle Gebäude gemittelte (klimabereinigte) Verbrauchskennwert von 17,9 kWh/(m²a) entspricht ziemlich genau dem nach DIN V 18599 ermittelten mittleren Bedarfskennwert von 18,1 kWh/(m²a).</p> <p>Neubauten<br/>n = 19<br/>Quelle: [Erhorn / Bergmann 2015]</p> |                             |

|   | <b>Studien zu Bestandsgebäuden</b> |
|---|------------------------------------|
| <p>3 <b>Energiepass-Feldversuch der dena – Auswertungen durch ISI, IBP und Öko-Institut</b></p> <p>Diagramm: Zusammenhang zwischen Endenergiebedarf und Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser (Grafik für eine von vier analysierten Größenklassen; Endenergiebedarf berechnet nach DIN V 4108-6 / 4701-10)</p> <p><i>Achtung: in dieser Grafik ist im Gegensatz zu den anderen Studien der Bedarf über dem Verbrauch aufgetragen</i></p> <p>Bestandsgebäude<br/>n = 1082<br/>Quelle: [Gruber et al. 2005]</p> |                                    |
| <p>4 <b>Datensätze aus der Energieberatung / Analyse durch das IWU im Kontext eines Projekts zum ökologischen Miet-spiegel</b></p> <p>Diagramm: Zusammenhang zwischen Endenergieverbrauch und Endenergiebedarf für Heizung (Grafik für eine von vier analysierten Größenklassen, Endenergiebedarf berechnet nach DIN V 4108-6 / 4701-10)</p> <p>Bestandsgebäude<br/>n = 1702<br/>Quelle: [Knissel et al. 2006]</p>  |                                    |

|   |  |
|---|--|
| <p>5 <b>Projekt zur Optimierung von bestehenden Heizungsanlagen OPTIMUS</b></p> <p>Diagramm: Zusammenhang zwischen Endenergieverbrauch und Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser sowie Abbildung des Zusammenhangs durch eine Potenzfunktion (Endenergiebedarf berechnet nach DIN V 4108-6 / 4701-10)</p> <p>Bestandsgebäude<br/>n = 59<br/>Quelle: [Jagnow et al. 2007]</p>          |  |
| <p>6 <b>Masterarbeit an der TU Darmstadt zum Verbrauch modernisierter Mehrfamilienhäuser</b></p> <p>Diagramm: Zusammenhang zwischen Endenergieverbrauch und Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser (Endenergiebedarf nach TABULA-Verfahren mit Standardrandbedingungen, reales Klima, nicht kalibriert)</p> <p>modernisierte Mehrfamilienhäuser<br/>n = 51<br/>Quelle: [Graf 2016]</p> |  |
| <p>7 <b>Auswertung der Verbrauchskennwerte von dena-Effizienzhäusern</b></p> <p>Diagramm: Zusammenhang zwischen Endenergieverbrauch und Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser / Werte von Gebäuden mit Elektro-Wärmepumpen sind in gelber Farbe dargestellt</p> <p>Neubauten und modernisierte Altbauten<br/>n = 121<br/>Quelle: [Bigalke et al. 2016]</p>                            |  |

|    | <b>Studien aus dem europäischen Ausland</b>  |  |
|----|--|--|
| 8  | <p><b>Empirisch ermittelte Erwartungsintervalle des Energieverbrauchs im Energiepass Luxemburg</b></p> <p>Diagramm: Zusammenhang zwischen Endenergieverbrauch und Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser (Endenergiebedarf berechnet entsprechend den Vorschriften des Luxemburger Energiepasses, die an DIN V 4108-6 / 4701-10 angelehnt sind)</p> <p>Neubauten und Altbauten</p> <p>n = 4255</p> <p>Quelle: [Hörner et al. 2015] und [Hörner et al. 2016]</p>   |  |
| 9  | <p><b>Studie in den Niederlanden: „Effectiveness of energy renovations: a reassessment based on actual consumption savings“</b></p> <p>Diagramm: Gegenüberstellung der berechneten und der tatsächlichen Einsparung bei Durchführung unterschiedlicher Energiesparmaßnahmen (es werden nur die Einsparungen gezeigt; Verbrauchskennwerte und Bedarfskennwerte werden im Artikel nicht dargestellt); Auswertung für 173.032 Fälle (Wohnungen)</p> <p>Einzelwohnungen in Mehrfamilienhäusern</p> <p>(Anzahl Gebäude unbekannt)</p> <p>[Filippidou et al. 2018]</p> | <p>Fig. 5 Mean actual and predicted gas consumption savings for dwellings with single ESMs</p> |
| 10 | <p><b>Studie in den Niederlanden: „Predicting Energy Consumption and Savings in the Housing Stock “</b></p> <p>Diagramm: Tatsächlicher und berechneter Gasverbrauch in niederländischen Gebäuden bzw. Wohnungen mit Energie-Label, unterschieden nach den Energieeffizienzklassen. Auswertung für 193.856 Fälle</p> <p>[Majcen 2016]</p>   |  |

|  |  |
|--|--|
| <p>11 <b>Studie in Norwegen: „Predicting Energy Consumption and Savings in the Housing Stock“</b></p> <p>Diagramm: Auftragung des gemessenen über dem berechneten Energieverbrauch in norwegischen Gebäuden bzw. Wohnungen aus einer Energieausweis-Datenbank. Darstellung von Mittelwerten für verschiedene Gebäudeklassen. Auswertung von ca. 22.000 Fällen</p> <p>[Borg 2015]</p> |  |
|--|--|

Tabelle 1 sortiert die Untersuchungen in drei Gruppen:

Nr. 1-2: Deutschland: Neubauten

Nr. 3-7: Deutschland: Bestandsgebäude (teils auch mit Neubauten)

Nr. 8-10: Luxemburg, Niederlande und Norwegen: Bestandsgebäude (teils mit Neubau)

Die beiden Neubau-Untersuchungen zeigen eine insgesamt zumindest befriedigende Übereinstimmung von berechnetem Bedarf und gemessenem Verbrauch (Nr. 1 von 2005 auf Basis eines IWU-Bilanzverfahrens, Nr. 2 aktuell von 2016 auf Basis der auch im Rahmen von EnEV und Energieausweisen angewendeten DIN V 18599).

In den Untersuchungen zu den Bestandsgebäuden basieren die berechneten Bedarfswerte teilweise auf den dem EnEV-Energieausweis zu Grunde liegenden Normen DIN V 4108-6 / DIN V 4701-10, dies gilt für Nr. 3, 4, 5 und 7. Auch die Untersuchungen luxemburgischer Energieausweise in Nr. 8 lassen sich hier einreihen, da das Berechnungsverfahren in Luxemburg weitgehend auf dem deutschen Verfahren nach DIN V 4108-6 und 4701-10 aufbaut (allerdings ist die Bezugsfläche unterschiedlich).

Die Auswertungen in Untersuchung 6 wurden nicht in Anlehnung an EnEV/Energieausweise, sondern mit dem eigenständigen TABULA-Verfahren [Loga et al. 2013] durchgeführt.

Alle in Tabelle 1 aufgeführten Untersuchungen über Bestandsgebäude zeigen übereinstimmend, dass die tatsächlichen Energieverbräuche durch die berechneten Energiebedarfswerte im Mittel überschätzt werden, und zwar vor allem im Bereich hoher Bedarfe (also bei nicht oder wenig modernisierten Gebäuden). Die Überschätzung des Energieverbrauchs lässt sich in den ausgewählten Diagrammen daran erkennen, dass in der Darstellung mit Bedarfswerten auf der waagerechten x-Achse und Verbrauchswerten auf der senkrechten y-Achse die überwiegende Mehrzahl der Punkte deutlich unter der jeweiligen „Winkelhalbierenden“ ( $y = x$ ) liegt, die den Idealfall einer genauen Übereinstimmung von Energieverbrauch ( $y$ ) und Energiebedarf ( $x$ ) anzeigen würde<sup>4</sup>.

Die internationalen Studien, neben Luxemburg (s. o.), aus den Niederlanden und Norwegen zeigen, dass die Problematik einer Überschätzung des Energieverbrauchs insbesondere bei unmodernisierten Gebäuden auch in anderen Ländern auftritt.

Angesichts der Schwierigkeiten, einen umfassenden Überblick über die internationale Situation zu gewinnen (z. B. aufgrund der Vielfalt der Literatur zum Thema Gebäude/Energie und wegen teils in Landessprache verfassten Studien), kann die vorliegende Auswahl keinerlei Anspruch auf Voll-

<sup>4</sup> Die Winkelhalbierende ist in einigen, aber nicht in allen Diagrammen mit eingezeichnet. Im Fall der Studie 3 sind die Achsen vertauscht, so dass die Punkte hier über der Winkelhalbierenden liegen. In Studie 4 ist nicht die Winkelhalbierende, sondern eine Ausgleichsgerade eingetragen.

ständigkeit erheben. Dennoch ist der Umstand, dass hier nur wenige Studien identifiziert werden konnten, als Hinweis darauf zu werten, dass eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge von gemessenem Energieverbrauch und berechnetem Bedarf auch im internationalen Bereich noch nicht umfassend und systematisch stattgefunden hat.

Dies entspricht auch den Erfahrungen aus den vom IWU koordinierten europäischen Forschungsprojekten EPISCOPE und TABULA<sup>5</sup>, an denen Wissenschaftler aus 20 Ländern (unter anderem den Niederlanden und Norwegen) beteiligt waren. Die Frage des Vergleichs von Energiebedarfs- und –verbrauchswerten wurde auch in diesen Projekten thematisiert, nur wenige Partner konnten hier aber systematische Studien im nationalen Bereich identifizieren. In einigen Fällen konnten immerhin Einschätzungen im Sinne einer „Expertenschätzung“ abgegeben werden. Diese deuteten tendenziell ebenfalls auf eine Überschätzung des Energieverbrauchs ungedämmter Gebäude durch die jeweiligen Berechnungsmethoden hin.

Insgesamt machen die hier dargestellten empirischen Untersuchungen auf nationaler und internationaler Ebene deutlich, dass Abweichungen zwischen Verbrauch und Bedarf im Wohngebäudebestand ein generelles Phänomen darstellen. Insbesondere zeigen sich solche Abweichungen auch für das in Deutschland im Zusammenhang mit dem EnEV-Nachweis und der Energieausweis-Erstellung angewendete Verfahren.

Vor diesem Hintergrund war es ein wesentliches Ziel der Untersuchung die Abweichungen zwischen der Energiebedarfsberechnung und den tatsächlichen durchschnittlichen Verbräuchen nicht nur für das beim Monitoring angewendete „SEP“-Verfahren zu ermitteln (s. Kap. 4.2), sondern im Vergleich dazu auch das Verfahren nach EnEV/Energieausweis zu analysieren (s. Kap. 4.3). Zunächst werden aber in Kapitel 3 die Grundlagen der Erhebung und Analyse dargestellt.

---

<sup>5</sup> Die gemeinsame Internetseite beider Projekte findet sich unter [www.episcope.eu](http://www.episcope.eu).

### 3 Durchführung der Erhebung und der Analysen

Es wurde eine umfangreiche Stichprobenerhebung von Gebäude- und Energieverbrauchsdaten bei den Fördermittelempfängern durchgeführt. Zunächst wurde ein „elektronischer“ Fragebogen für die Durchführung der Datenerhebung im Internet erstellt und am IWU getestet (s. Unterkapitel 3.1). Die Erhebung wurde dann im Laufe des Jahres 2017 in zwei Pilotphasen und einer Hauptphase durchgeführt (s. 3.2). Die erhobenen Gebäude- und Energieverbrauchsdaten aller drei Phasen sind in die Auswertung eingeflossen. Dabei wurde in Form von Regressionsanalysen der funktionale Zusammenhang zwischen tatsächlich gemessenem und theoretisch berechnetem Endenergieverbrauch untersucht (s. 3.3).

#### 3.1 Elektronischer Fragebogen

Durch den „elektronischen Fragebogen“ sind gegenüber dem normalen „Papierfragebogen“ Plausibilitätstests zur Vermeidung von Fehleinträgen bereits direkt bei der Befragung möglich. Die Durchführung der Erhebung wird dadurch erheblich vereinfacht (kein Versand mehrseitiger Fragebögen, keine Notwendigkeit des Einlesens der zurücklaufenden Papierfragebögen). Für die Befragten wird der Ablauf dadurch erleichtert, dass sie durch Verzweigungen und Sprünge nur an die Stellen im Fragebogen geleitet werden, die für sie auch relevant sind.

Zur Erstellung des Fragebogens wurde die Software SSI-Web der Firma Sawtooth verwendet. Es konnte auf eine Vorlage aus einem früheren IWU-Projekt<sup>6</sup> zurückgegriffen werden – allerdings waren bei der Anpassung an die vorliegende Fragestellung eine komplette Umstrukturierung sowie umfangreiche Änderungen und Ergänzungen notwendig.

Bei der Fragebogenentwicklung wurden insbesondere folgende Ziele verfolgt:

- Gleichzeitige zuverlässige Ermittlung sowohl des Energieverbrauchs als auch der für die Energiebilanz erforderlichen Merkmale des Gebäudes und Wärmeversorgungssystems.
- Vermittlung dieses Ziels an die Befragten. Insbesondere wurde verdeutlicht, dass die Energieverbräuche und das beschriebene Gebäude „zusammenpassen“ müssen, d. h. die Energieverbräuche des Hauptenergieträgers sollten für das Gebäude vollständig (d. h. für alle Gebäudeteile) angegeben werden und es sollten keine Verbräuche eventuell mitversorgter Nachbargebäude genannt werden.
- Differenzierte Abfrage unterschiedlicher Arten und Merkmale des Energieverbrauchs für den Haupt-Energieträger der Beheizung in den vergangenen circa fünf Jahren, zum Beispiel Verbrauchsangabe mit bzw. ohne Warmwassererzeugung, als jährliche Verbrauchsangabe bzw. Liefermenge, Vorhandensein ergänzender Systeme (neben dem Haupt-Wärmeversorgungssystem), Berücksichtigung von Hilfsgeräten in den Verbrauchswerten (bei elektrischem Strom), Grenze der Verbrauchsbilanzierung bei elektrischem Strom/Photovoltaikanlagen bzw. Fernwärme/Solarthermie-Anlagen.
- Abfrage von Besonderheiten der Nutzung bzw. von Maßnahmen während der angegebenen Verbrauchsperiode, zum Beispiel Frage nach einer (weitgehend) durchgängigen Nutzung und Beheizung bzw. längerer Abwesenheits- bzw. Leerstands, Einschränkung der Verbrauchsperiode auf einen Zeitraum, in dem keine für den Energieverbrauch relevanten Maßnahmen am Gebäude bzw. Heizsystem durchgeführt wurden.

---

<sup>6</sup> Forschungsprojekt „Datenaufnahme Gebäudebestand“ im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, abgeschlossen 2013, siehe: <https://www.iwu.de/forschung/energie/2013/datenaufnahme-gebaeudebestand/>

- Differenzierte Abfrage der für die Energiebilanz relevanten Merkmale: Allgemeine Gebäudeeigenschaften, Wärmeschutz und Wärmeversorgung, Lüftung, zusätzlich Angaben aus dem Energiebedarfsausweis (falls vorhanden). Die Fragen weisen generell einen hohen Detaillierungsgrad auf. Dadurch wird einerseits eine Rückübersetzung in einfachere Papierfragebögen (z. B. für das Monitoring) und andererseits eine darüber hinausgehende Analyse von speziellen Fragestellungen ermöglicht.
- Durchführung eines vereinfachten Plausibilitätstests bereits am Ende der Online-Befragung (für geeignete, d. h. einfach auswertbare Fälle), so dass ungewöhnlich hohe bzw. niedrige bzw. stark schwankende Verbräuche vom Befragten gegebenenfalls direkt kommentiert bzw. korrigiert werden konnten.

Der Fragebogen umfasst insgesamt circa 170 Einzelfragen bzw. Hinweisseiten, die aber auf Grund von Verzweigungen und Sprunganweisungen bei einem Befragungsdurchgang nicht alle aufgerufen werden.

Vor der Anwendung in den Feldphasen wurde mit dem Fragebogen ein „Pretest“ am IWU durchgeführt.

### 3.2 Erhebungskonzept und Phasen der Erhebung

Bei der Durchführung der Felduntersuchung gab es eine Unterscheidung von drei Erhebungsgruppen, in die die betroffenen Fördermittelempfänger eingeteilt und mit der Bitte um Teilnahme angeschrieben wurden:

- Erhebungsgruppe A („vor Modernisierung“): Fördermittelempfänger im Programm „Energieeffizient Sanieren“ mit Förderzusage im Jahr 2016. Die Verbrauchswerte der letzten Jahre spiegeln hier den Gebäudezustand vor Modernisierung wider.
- Erhebungsgruppe B („nach Modernisierung“): KfW-Fördermittelempfänger im Programm „Energieeffizient Sanieren“ mit Förderzusage im Jahr 2010 bzw. 2011. Die Verbrauchswerte der letzten Jahre beziehen sich hier auf den Gebäudezustand nach Modernisierung.
- Erhebungsgruppe C („Neubau“): Fördermittelempfänger im Programm „Energieeffizient Bauen“ mit Förderzusage im Jahr 2010 bzw. 2011. Hier liegen in der Regel über mehrere Jahre Verbrauchswerte nach Errichtung der Gebäude vor. Die heute noch geförderten Standards Effizienzhaus 55 und 40 waren bereits damals teil des Förderprogramms.<sup>7</sup>

Für die Stichprobenziehung wurden die Erhebungsgruppen zunächst noch in Teilmengen („Schichten“) untergliedert. Insbesondere wurden Fälle mit 1 - 2 bzw. 3 und mehr Wohnungen pro Förderfall unterschieden, um auch in ausreichendem Maße Mehrfamilienhäuser zu erfassen. In der Gruppe A wurde darüber hinaus noch unterschieden, ob eine Einzelmaßnahmen- oder Effizienzhausförderung beantragt worden war, so dass sich insgesamt vier Teilmengen ergaben. In Gruppe B lag mit insgesamt 26 Teilmengen die stärkste Differenzierung vor. Hier wurden einerseits verschiedene Arten der Einzelmaßnahmenförderung und andererseits verschiedene Effizienzhausstandards unterschieden. Unterschiedliche Effizienzhausstandards waren auch die Grundlage für die Ausdifferenzierung der Gruppe C in 10 Teilmengen.

Die Unterteilung in Schichten diente hier, anders als beim jährlichen Monitoring, nicht der Hochrechnung der Stichprobe auf ein bestimmtes Förderjahr. Vielmehr soll das weiterentwickelte Verfahren flexibel auf unterschiedliche Zusammensetzungen von Gebäuden und Effizienzmaßnahmen auch in zukünftigen Jahren anwendbar sein. Vor diesem Hintergrund kam es vor allem darauf an,

<sup>7</sup> Das heute ebenfalls geförderte Effizienzhaus 40 Plus, das sich allerdings im Hinblick auf Primärenergie- und Wärmeschutzanforderungen nicht vom Effizienzhaus 40 unterscheidet, ist in der Stichprobe noch nicht enthalten. Außerdem gab es 2010/11 Förderfälle mit den Effizienzhausstandards 85 und 70 sowie dem Passivhausstandard. Die nicht mehr geförderten Effizienzhäuser 85 und 70 sind aktuell noch als Annäherung an den jetzigen EnEV-Neubau-Standard von Interesse (siehe Kap. 5.4). Passivhäuser werden in der Erhebung in der Regel als Effizienzhäuser 40 eingeordnet, falls sie als Effizienzhäuser 55 gefördert wurden, werden sie dieser Gruppe zugerechnet.

im Hinblick auf die (vom energetischen Niveau abhängige) Anpassung des berechneten Energiebedarfs an reale Verbräuche ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher energetischer Standards zu erhalten – insbesondere im Bestand vom unsanierten Altbau über teilsanierte Gebäude bis hin zu den besten Effizienzhaussanierungen.

Es war das Ziel, in jeder der drei Erhebungsgruppen A-C rund 10.000 Fördermittelempfänger anzuschreiben und um Teilnahme an der Internet-Befragung zu bitten. Unter Berücksichtigung der Schichteneinteilung und der dabei zu Verfügung stehenden Adressen von Fördermittelempfängern wurden insgesamt circa 29.260 Adressen identifiziert und an diese die Anschreiben mit der Bitte um Teilnahme und mit Zugangscode versendet, davon jeweils ca. 3000 bzw. 10 % in der ersten und zweiten Pilotphase und 23.260 bzw. knapp 80 % in der Hauptphase. Die Pilotphasen dienten dazu, Erfahrungen mit dem elektronischen Fragebogen und dem Ablauf der Befragung zu sammeln. Nach der ersten Pilotphase wurde der Internetauftritt und insbesondere auch die Auffindbarkeit der Befragungsseite über Internet-Suchmaschinen verbessert<sup>8</sup>. Am elektronischen Fragebogen wurden jeweils nur unwesentliche Änderungen durchgeführt, so dass die Daten aller drei Phasen weitgehend einheitlich für die Auswertung zur Verfügung standen.

Die Teilnahmequote lag über alle Befragungsphasen hinweg in einer ähnlichen Größenordnung. Insgesamt haben 2.908 Fördermittelempfänger, also rund 10 % der angeschriebenen Befragten, den Internet-Fragebogen aufgerufen. Regulär zu Ende geführt wurde die Befragung in 1.687 Fällen, und zwar 461-mal in Erhebungsgruppe A, 631-mal in Gruppe B und 595-mal in Gruppe C. In den übrigen Fällen lag ein Abbruch vor, der entweder durch die Internetsoftware aufgrund der Fragebogenlogik (insgesamt 417-mal, z. B. in Fällen, in denen wichtige Angaben wie etwa Verbrauchsdaten fehlten) oder durch die Befragten selbst vorgenommen wurde (häufig an Stellen, an denen im nächsten Schritt ein automatischer Abbruch erfolgt wäre). Ein geringer Anteil der abgebrochenen Fragebögen war für Auswertungen dennoch nutzbar, wenn bei diesen ein Großteil der Angaben (inklusive Energieverbräuchen) vorlag. Allerdings gingen aufgrund weitergehender Plausibilitätstests und Filterkriterien in den späteren Datenanalysen erhebliche Anteile für die Auswertung der jeweiligen konkreten Fragestellungen verloren (vgl. Kap. 4.2 und 5.3).

### 3.3 Ansätze für die Datenanalyse

Die vorliegenden empirischen Daten ermöglichen für den jeweiligen Haupt-Energieträger die Anpassung der (aus den Merkmalen der Gebäude- und Wärmeversorgungssysteme) berechneten Energiebedarfswerte an die tatsächlich in den Gebäuden erreichten Energieverbräuche. Dabei wird wie in früheren vergleichbaren Untersuchungen des IWU<sup>9</sup> berücksichtigt, dass die Abweichungen zwischen berechnetem Verbrauch und gemessenem Bedarf nicht über alle Energiestandards hinweg gleich sind. Vor diesem Hintergrund verwendet der gewählte Modellansatz eine Anpassungsfunktion, die von der Höhe des (ursprünglichen) Energiebedarfs abhängt:

$$q_{B,V} = f(q_B)$$

mit:  $q_{B,V}$ : Korrigierter (an Verbrauchswerte angepasster) Endenergiebedarf in kWh pro m<sup>2</sup> Bezugsfläche und Jahr

$q_B$ : ursprünglich berechneter Energiebedarf

$f(q_B)$ : Anpassungsfunktion (abhängig von  $q_B$ )

Die Stichprobenergebnisse und die daraus ermittelten Anpassungsfunktionen werden im Folgenden in x-y-Diagrammen dargestellt, wobei die x- bzw. y-Werte der eingezeichneten Einzelpunkte den (ursprünglichen) berechneten Energiebedarf  $q_B$  bzw. den Energieverbrauch  $q_V$  für das jeweili-

<sup>8</sup> Siehe auch Erfahrungsbericht des IWU zur 1. Pilotphase vom 25.04.2017.

<sup>9</sup> Siehe z. B.: T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born: Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 10.02.2015.

ge Gebäude darstellen. Als gestrichelte Linie ist zu Vergleichszwecken die Winkelhalbierende  $y = x$  eingetragen: Hier würden im Idealfall, wenn Bedarf und Verbrauch immer genau übereinstimmen, alle Punkte liegen. Als weitere Kurve wird die jeweilige mit Hilfe der Anpassungsrechnung abgeleitete Funktion  $y = q_{B,V} = f(q_B)$  eingezeichnet. Die Anpassungsrechnungen basieren grundsätzlich auf der Methode der linearen Regressionsanalyse.

Bei der Auswertung der Energieverbrauchswerte wurden Mittelwerte über die zur Verfügung stehenden Verbrauchsperioden gebildet. Es war zu berücksichtigen, dass die betroffenen Winter der Jahre 2012 bis 2016 insgesamt etwas milder waren als im langjährigen Durchschnitt und insbesondere im Vergleichsklima „Potsdam“ der Energieeinsparverordnung (EnEV), das auch beim Monitoring der Programme Anwendung findet. Vor diesem Hintergrund wurde eine Temperaturbereinigung wie folgt durchgeführt: Für die Einzelgebäude wurde eine Energiebilanz mit dem TABULA-Verfahren sowohl für das Referenzklima Potsdam als auch für ein aus den ausgewerteten Messperioden ermitteltes mittleres Klima der Verbrauchsperiode berechnet<sup>10</sup>. Die Relation der Energiebedarfswerte für den Haupt-Energieträger ergab für jedes Einzelgebäude einen individuellen Klimakorrekturfaktor, mit dem dessen Energieverbrauchswert multipliziert wurde, bevor er in die Analyse einging.

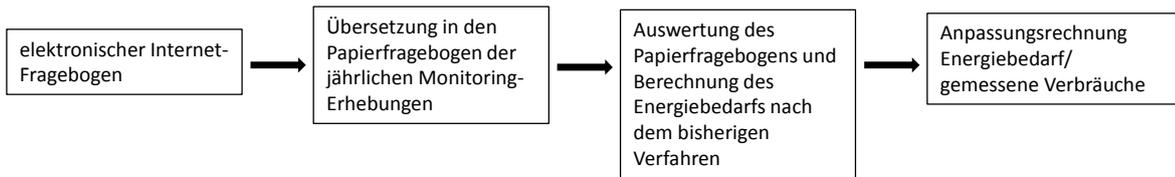
Ziel der Analysen war insbesondere die Weiterentwicklung der Energiebilanzverfahren, die vom IWU bisher für das Monitoring der Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ angewendet wurde. In diesem Zusammenhang war zu berücksichtigen, dass bei den jährlichen Erhebungen zu den Programmen nicht der elektronische Internetfragebogen, sondern jeweils ein Papierfragebogen eingesetzt wurde. Da dieser Papierfragebogen nach dem Einlesen noch mit Hilfe von Auswertungsalgorithmen plausibilisiert und teilweise auch bei einzelnen Antwortausfällen ergänzt wird, geht es beim Abgleich des berechneten Energiebedarfs mit dem gemessenen Verbrauch genau genommen nicht nur um den Abgleich eines bestimmten Energiebilanzverfahrens, sondern um die Anpassung eines Gesamtkonzepts bestehend aus Fragebogen, Auswertungs- und Interpretationsalgorithmen des Fragebogens und zugehörigem Bilanzverfahren.

Besonders komplex ist die Situation im Programm „Energieeffizient Sanieren“, da hier in einem einzigen Fragebogen zwei Gebäudezustände – nämlich vor und nach der Modernisierung – erfasst werden. Dies erfolgt mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad und auf unterschiedliche Weise: Der Ursprungszustand vor der Modernisierung wird relativ grob erfasst, der Zustand nach der Modernisierung wird nicht separat abgefragt, sondern aus dem Ursprungszustand und den detailliert erhobenen Modernisierungsmaßnahmen abgeleitet. Aus praktischer Sicht ist dies ein sinnvoller Ansatz für die Abfrage von Modernisierungsmaßnahmen bei einer schriftlichen Befragung.

Vor diesem Hintergrund erfolgte die Durchführung der Analysen für die Weiterentwicklung der Monitoringansätze gemäß dem in Abbildung 1 dargestellten Schema. Dieses gilt, mit jeweils im Detail unterschiedlichen Ansätzen, sowohl für die Auswertungen im Programm „Energieeffizient Sanieren“ als auch im Programm „Energieeffizient Bauen“.

---

<sup>10</sup> Hierzu wurden zunächst die verfügbaren Messperioden der Einzelgebäude gemittelt und dann eine gleichgewichtete Mittelung über alle Gebäude mit Verbrauchswerten durchgeführt. Das heißt, hier wie auch bei den späteren Analysen wurden alle auswertbaren Gebäude gleichgewichtet behandelt (also unabhängig davon, auf wie vielen Messperioden der Verbrauchswert der jeweiligen Gebäude beruhte). Das mittlere Klima weist bei Betrachtung einer Heizgrenze von 12 °C 210 Heizztage und eine Heizgradtagsumme von 1410 Kd (Kelvin-Tagen) auf. Demgegenüber liegen beim EnEV-Referenzklima Potsdam 216 Heizztage mit einer Heizgradtagsumme von 1598 Kd vor.



**Abbildung 1 Schema für die Anpassung der Energiebilanzverfahren beim Monitoring der Programme „Energieeffizient Sanieren“ bzw. „Energieeffizient Bauen“ an reale Energieverbräuche**

Aus dem Schema wird deutlich, dass für den Vergleich mit dem beim Monitoring angewendeten Berechnungsverfahren zunächst der elektronische Fragebogen der Interneterhebung in den Papierfragebogen des jährlichen Monitorings übersetzt wurde. Dies war möglich, da der Internetfragebogen im Hinblick auf die Eigenschaften von Gebäude und Wärmeversorgungssystem insgesamt detaillierter war als die Papierfragebögen des jährlichen Monitorings. Erst nach dieser Übersetzung erfolgte die weitere Auswertung. Auf diese Weise wurde erreicht, dass die Energiebilanzberechnungen weitgehend dem beim jährlichen Monitoring angewendeten Verfahren entsprechen und daher auch der Vergleich mit den tatsächlichen Energieverbräuchen für dieses Verfahren aussagekräftig ist.

## 4 Untersuchung von gemessenen und berechneten Energieverbräuchen im Wohngebäudebestand

### 4.1 Endenergieverbräuche im Überblick

In Tabelle 2 wird ein Überblick über die durchschnittlich gemessenen Energieverbräuche (Haupt-Energieträger des jeweiligen Gebäudes) für verschiedene Teilmengen der Erhebung gegeben. Dabei werden die verschiedenen Energieträger (Haupt-Energieträger der Wärmeversorgung) und Erhebungsgruppen (A: vor der Modernisierung / B: nach der Modernisierung) unterschieden. Gruppe B ist noch einmal nach Einzelmaßnahmen (inklusive Maßnahmenkombinationen) und Effizienzhausanierungen differenziert. Vor der Auswertung wurde die Stichprobe durch entsprechende Plausibilitätstests eingeschränkt<sup>11</sup>. Mit angegeben ist jeweils der statistische Standardfehler des Energieverbrauchs.

**Tabelle 2 Durchschnittliche gemessene Energieverbräuche verschiedener Teilmengen der Erhebung im Gebäudebestand im Überblick (Haupt-Energieträger)**

| gemessener Endenergieverbrauch (Mittelwerte)  |            |            |           |           |            |            |
|---|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|
| in kWh/m <sup>2</sup> a bezogen auf die beheizte Wohnfläche, bei Brennstoffen: (Unterer) Heizwert |            |            |           |           |            |            |
|   |            | Fernwärme  | Erdgas    | Heizöl    | Strom      | Biomasse   |
| alle Gebäude  | Fallzahl   | 27         | 375       | 169       | 34         | 56         |
|   | Mittelwert | 114 +/- 8  | 133 +/- 3 | 151 +/- 5 | 34 +/- 5   | 138 +/- 8  |
| Gruppe A  | Fallzahl   | 12         | 163       | 84        | 4          | 10         |
|   | Mittelwert | 141 +/- 10 | 162 +/- 5 | 182 +/- 8 | 101 +/- 20 | 210 +/- 28 |
| Gruppe B,   | Fallzahl   | 9          | 167       | 68        | 7          | 14         |
| Einzelmaßnahmen   | Mittelwert | 117 +/- 8  | 118 +/- 4 | 129 +/- 7 | 29 +/- 5   | 141 +/- 9  |
| Gruppe B,   | Fallzahl   | 6          | 45        | 17        | 23         | 32         |
| Effizienzhäuser   | Mittelwert | 58 +/- 10  | 81 +/- 4  | 83 +/- 7  | 24 +/- 2   | 114 +/- 8  |

Aufgrund geringer Fallzahlen sind die Ergebnisse zum Teil wenig aussagekräftig. Felder mit weniger als 20 Fällen sind entsprechend kenntlich gemacht (blaue, verkleinerte Schrift). Es wird deutlich, dass eine Auswertung nach Teilmengen schnell an Grenzen stößt. Auch dies ist ein Grund dafür, dass in den weiteren Untersuchungen auf die Methode der Regressionsanalyse zurückgegriffen wurde, bei der alle Untersuchungsfälle mit ihren Merkmalen gemeinsam in die Berechnung eingehen.

Darüber hinaus ist darauf hinzuweisen, dass die tabellierten Ergebnisse nicht als generell repräsentativ anzusehen sind, da – wie in Kapitel 3.2 erläutert – die Stichprobenerhebung nicht der Hochrechnung auf ein bestimmtes Förderjahr sondern der Gewinnung einer großen Bandbreite unterschiedlicher Förderstandards dient.

Davon abgesehen ist festzustellen, dass die Ergebnisse insgesamt ein plausibles Bild liefern: Die Verbrauchswerte vor der Modernisierung (Gruppe A) liegen im Durchschnitt höher als die der modernisierten Gebäude (Gruppe B). Dabei ist zu beachten, dass in Gruppe A nicht nur vollständig unmodernisierte und in Gruppe B aufgrund der Einzelmaßnahmenförderung nicht nur vollständig modernisierte Gebäude enthalten sind. Vielmehr gibt es aufgrund energetisch teilweise moderni-

<sup>11</sup> Siehe hierzu das folgende Kapitel 4.2: Angewendet wurden die Kriterien der dort dargestellten Variante 2.

sierter Gebäude einen weiten Überschneidungsbereich der Gruppen A und B im Hinblick auf die Energieeffizienz und die resultierenden Energieverbräuche und -bedarfe. Am niedrigsten sind die Werte für die Effizienzhaus-Modernisierungen (unterste Zeile). Im Hinblick auf die Verwendung von elektrischem Strom als Energieträger ist zu beachten, dass nach der Modernisierung und insbesondere in den Effizienzhäusern in der Regel elektrische Wärmepumpen eingesetzt wurden, so dass die Verbrauchswerte hier generell deutlich niedriger liegen als bei den anderen Energieträgern.

Im Fall von Brennstoffen ist in Tabelle 2 der (untere) Heizwert angegeben. Dieser stellt auch im EnEV-Bilanzverfahren nach DIN V 4108-6 / 4701-10 die übliche Bewertungsgröße dar und wird auch später in Kapitel 5 bei den Neubauanalysen wieder aufgegriffen. In den folgenden Analysen der Abschnitte 4.2 bis 4.3 zum Wohngebäudebestand wird demgegenüber bei berechneten Energiebedarfs- und gemessenen Energieverbrauchswerten immer der Brennwert („oberer Heizwert“) verwendet, da dieser direkt als interne Berechnungsgröße in das beim Monitoring angewendete SEP-Verfahren eingeht. Auch in Kapitel 6 sind die Angaben auf den Brennwert bezogen, da dieser für das TABULA-Verfahren als Grundlage dient.

## 4.2 Analyse des SEP-Verfahrens

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der Bilanzierung entsprechend dem SEP-Verfahren des IWU, das beim Monitoring der Programme angewendet wurde, genauer untersucht. Die berechneten Energiebedarfswerte werden mit den gemessenen Verbräuchen verglichen und entsprechende Anpassungsfunktionen abgeleitet.

Bei den dazu durchgeführten Regressionsanalysen werden die Erhebungsgruppen A (vor der Modernisierung) und B (nach der Modernisierung) gemeinsam betrachtet. Ausgehend von 1.092 Fragebögen, die bis zum Ende ausgefüllt wurden (461 in Gruppe A und 631 in Gruppe B, vgl. Kap. 3.2) wurde die Untersuchungsmenge zunächst durch weitere Auswahl und Plausibilitätstests eingeschränkt. Dabei wurden zwei Varianten betrachtet: Variante 1 mit deutlich eingeschränkter Fallzahl (499 Gebäude) und Variante 2 mit großzügigerer Auslegung der Plausibilitäts- und Auswahlbedingungen (662 Gebäude). Die Vorgehensweise bei der Auswahl ist hier für Variante 1 erläutert:

Aufgrund individueller textlicher Anmerkungen im Fragebogen wurden 9 Fälle ausgeklammert. Gebäude mit zwei und mehr Wohnungen und gleichzeitig Etagen- und Einzelofenheizung wurden ebenfalls ausgenommen, da hier nicht klar war, ob der Verbrauch der Gebäude oder von Einzelwohnungen gemeldet wurde (31 Fälle). Weitere 55 Fälle wurden ausgenommen, da hier gleichzeitig Gewerbeflächen vorlagen, so dass der Flächenbezug der Auswertung unsicher erschien. 40 Fragebögen entfielen, da der Haupt-Energieträger oder die Art des Haupt-Wärmeerzeugers nicht angegeben war<sup>12</sup>. Für 12 Fälle ließ sich aufgrund fehlender oder unplausibler Angaben kein Energiebedarf nach dem Monitoringverfahren berechnen. Zu den verbleibenden 945 Fällen kamen 20 hinzu, die den elektronischen Fragebogen zwar nicht zu Ende geführt, aber dennoch an diesem Punkt der Auswertung genug Angaben für die weitere Analyse gemacht hatten.

Für die anschließende Analyse der Energieverbrauchsdaten standen somit noch 965 Gebäude zur Verfügung. Nach Abzug von 198 Fällen, in denen keine Verbrauchsdaten, sondern als weniger zuverlässig erachtete Liefermengen<sup>13</sup> vorlagen, verblieben 767 Fälle. Weiterhin ausgeklammert wur-

---

<sup>12</sup> In einem Fall war lag Blockheizkraftwerk vor, das sich hier bezüglich des Brennstoffverbrauchs aufgrund der gleichzeitigen Stromproduktion nicht auswerten ließ.

<sup>13</sup> Eine Liefermenge (z. B. bei der Füllung eines Öltanks oder eines Holzpelletlagers) entspricht nur dann dem Verbrauch seit der letzten Lieferung, wenn der Speicher (der Tank bzw. das Lager) in beiden Fällen gleich weit gefüllt wurde. In vielen Fällen der Verwendung von Heizöl und Holzpellet waren von den Befragten Verbräuche angegeben, der mögliche Speichereffekt also bereits herausgerechnet oder nicht vorhanden (z. B. bei Verwendung von Tankfüllstandsanzeigern). Daher konnte auf die Fälle, in denen Liefermengen verwendet wurden, bei enger Auslegung der

den 19 Fälle mit fehlenden bzw. unplausiblen Basisdaten (z. B. zur Periodenlänge) sowie 33 Fälle, in denen sich die angegebenen Verbrauchsperioden um mehr als 30 Tage von einer Jahresperiode (365 Tage) unterschieden<sup>14</sup>. Außerdem wurden in der Gruppe B nur Auswertungsperioden betrachtet, die mindestens 250 Tage (also ca. 8 Monate) Abstand von dem Endzeitpunkt der geförderten Modernisierung hatten, um Anfangseffekte (z. B. Heizen zum Entfernen von Baufeuchte, Korrektur von Systemeinstellungen, Belegung von Wohnungen erst nach Modernisierung) auszuklammern<sup>15</sup>. Es entfielen dadurch weitere 42 Fälle. Fünf Fälle wurden wegen unplausibel hoher Verbrauchswerte (höher als 400 kWh/m<sup>2</sup>a) weggelassen. Auf diese Weise wurde die Gesamtzahl der auswertbaren Fälle auf insgesamt 668 eingeschränkt. 10 Fälle davon entfielen jedoch, weil das Gebäude in der Verbrauchsperiode nicht durchgängig beheizt wurde (d. h. über längere Zeiträume bzw. in größeren Teilen leer stand). In weiteren 28 Fällen lagen keine bzw. unplausible Bedarfs- werte vor. Mit der weiteren Plausibilitätsbedingung, dass der Energieverbrauch nicht mehr als dreimal so hoch wie der Energiebedarf und nicht weniger als ein Drittel des Energiebedarfs betragen sollte, entfielen 50 Fälle mit zu geringen und 35 Fälle mit zu hohen Verbrauchswerten. Schließlich wurden noch 46 Fälle aussortiert, bei denen angegeben worden war, dass innerhalb der Verbrauchsperiode noch Maßnahmen stattgefunden hatten, so dass am Ende schließlich 499 Fälle für die Auswertung in Variante 1 zur Verfügung standen, und zwar 349 Ein- und Zweifamilien- häuser sowie 150 Mehrfamilienhäuser (mit drei oder mehr Wohnungen).

Die Ergebnisse für alle 499 Gebäude der Variante 1 sind in Abbildung 2 dargestellt.

Bezugsfläche ist hier die beheizte Wohnfläche, die auch im Papierfragebogen des jährlichen Monitorings erhoben wird. Bei Brennstoffen ist der obere Heizwert (Brennwert) angegeben. Zwar werden die Ergebnisse im jährlichen Monitoringbericht zum Programm „Energieeffizient Sanieren“ (entsprechend der Systematik in der Energieeinsparverordnung) auf den (unteren) Heizwert bezogen. Der Brennwert stellt aber ein wichtiges internes Zwischenergebnis in dem Energiebilanzverfahren für das Monitoring dar: Die im Folgenden erläuterte Korrekturfunktion  $q_{B,V}$  setzt an dieser Stelle an und lässt sich in dieser (auf den Brennwert bezogenen) Form direkt in das Verfahren übertragen.

Die unterschiedlichen Haupt-Energieträger der Fälle in Variante 1 sind farbig markiert: Elektrischer Strom: 30 Fälle (blau), Erdgas: 341 Fälle (rot), Flüssiggas: 1 Fall (ebenfalls rot), Heizöl: 80 Fälle (schwarz), Holz/Holzpellets: 23 Fälle (grün), Fernwärme: 24 Fälle (braun).

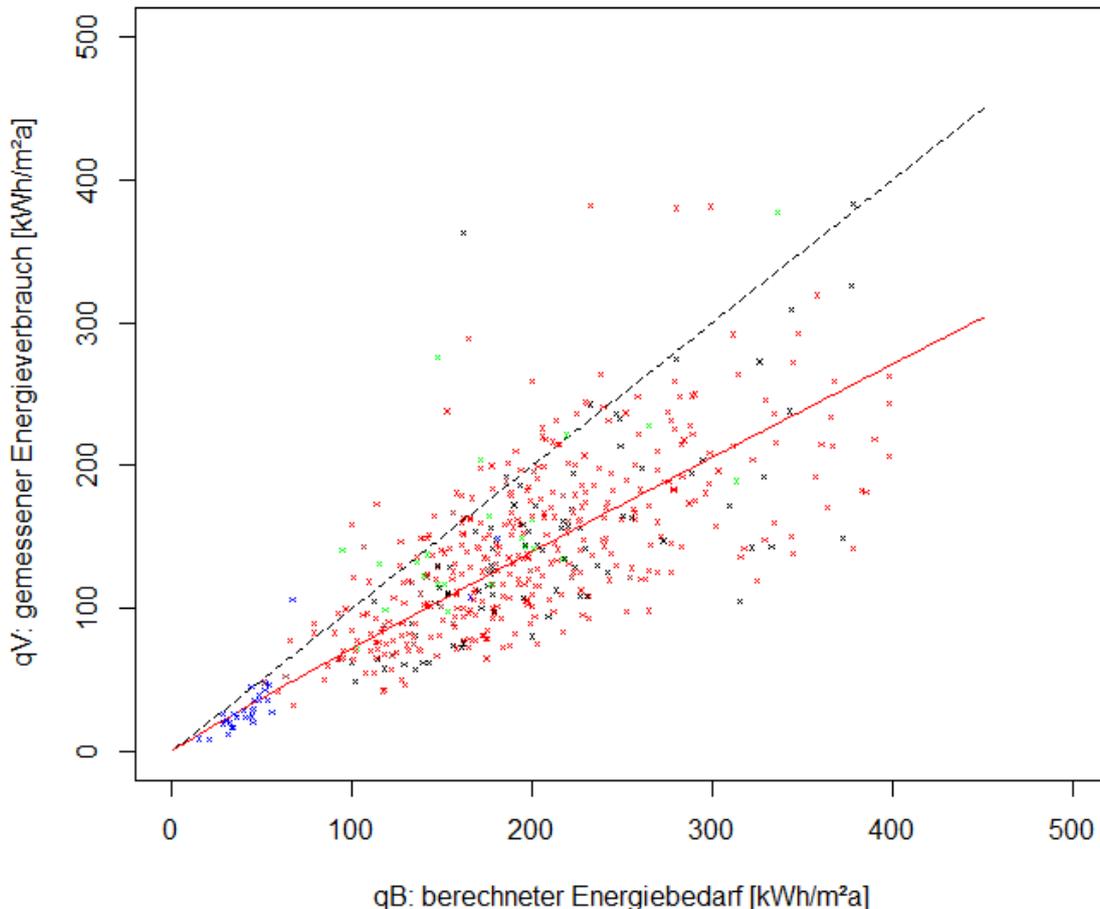
Der Vergleich mit der gestrichelt eingezeichneten Winkelhalbierenden ( $q_V = q_B$ ) lässt erkennen, dass über den gesamten Bereich die tatsächlichen Energieverbräuche zumeist niedriger liegen als die berechneten Energiebedarfswerte, der Verbrauch durch die Bedarfswerte also im Mittel überschätzt wird.

---

Bedingungen für eine sichere Datenlage (wie in Variante 1) verzichtet werden. In Variante 2 wurden sie hinzuge-  
nommen, wenn gleichzeitig angegeben worden war, dass die Vorräte in etwa gleich weit aufgefüllt wurden.

<sup>14</sup> Ausgeschlossen wurden hier jeweils einzelne Verbrauchsperioden. Vollständige Fälle entfielen nur dann, wenn keine  
einzige der gemeldeten Verbrauchsperioden innerhalb dieser Zeitgrenze lag.

<sup>15</sup> Untersucht wurde auch eine Ausweitung dieses Zeitraums auf 500 bzw. sogar 750 Tage. Die Auswirkungen auf das  
Gesamtergebnis waren dabei sehr gering bzw. kaum feststellbar.



**Abbildung 2 Energiebilanzverfahren „Energieeffizient Sanieren“ (SEP-Verfahren): Berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für den Haupt-Energieträger – Variante 1: eingeschränkte Fallzahl (499 Gebäude)**

Werte bezogen auf die beheizte Wohnfläche,  
 bei Brennstoffen: Angabe des Brennwertes (oberer Heizwert)  
 blau: elektrischer Strom, rot: Erdgas/Flüssiggas, schwarz: Heizöl,  
 grün: Holz/Holzpellets, braun: Fernwärme  
 gestrichelte Linie: Winkelhalbierende  $q_V = q_B$ ,  
 rote durchgezogene Linie: Anpassungsfunktion  $q_{B,V} = f(q_B)$

Zur Ermittlung der Anpassungsfunktion  $q_{B,V}$  wurde kein direkt linearer Zusammenhang zwischen Bedarf und Verbrauch, sondern vielmehr zwischen dem Logarithmus der beiden Ausgangsvariablen angenommen:

$$\ln(q_{B,V}) = c_0 + c_1 \ln(q_B)$$

Damit ergibt sich:

$$q_{B,V} = \exp(c_0 + c_1 \ln(q_B)) = \exp(c_0) q_B^{c_1} = c_2 q_B^{c_1}$$

$$\text{mit: } c_2 = \exp(c_0) = e^{c_0}$$

Durch diese Transformation der Ausgangsvariablen lässt sich ein gekrümmter Kurvenverlauf abbilden: Erfahrungsgemäß wird der tatsächliche Energieverbrauch in üblichen Bilanzverfahren stärker überschätzt, wenn die berechneten Bedarfswerte größer werden. Dieser Effekt lässt sich ohne Variablentransformation mit einem direkten linearen Ansatz nicht abbilden. Außerdem verschwindet bzw. verringert sich durch das Logarithmieren der Ausgangsvariablen das bei der linearen Re-

gression unerwünschte Phänomen der Heteroskedastizität (Streuung der  $q_V$ -Werte um eine gedachte Ausgleichsgerade ist abhängig von  $q_B$ , hier: Zunahme bei wachsendem  $q_B$ )<sup>16</sup>.

Ergebnis der Regressionsanalyse sind in Variante 1 die folgenden Koeffizienten:

$$c_0 = -0,1269 \pm 0,1396$$

$$c_1 = 0,9562 \pm 0,0270$$

Mit dem Symbol „ $\pm$ “ sind hier die statistischen Standardfehler der Regressionskoeffizienten angegeben.

$$\text{Damit folgt: } c_2 = e^{c_0} = 0,8808$$

Für die Ausgleichsfunktion in Variante 1 ergibt sich damit:

$$q_{B,V} = 0,8808 q_B^{0,9562}$$

Der Kurvenverlauf von  $q_{B,V}$  als Funktion von  $q_B$  ist als durchgezogene rote Linie im Diagramm eingezeichnet. Der Exponent von  $q_B$  liegt unter dem Wert eins, die Kurve ist also tatsächlich wie erwartet bei steigendem  $q_B$  nach rechts gekrümmt, allerdings nicht in sehr starkem Maße und daher in der Abbildung kaum unmittelbar zu erkennen.

In Variante 2 wurden die Grenzen für die Auswahl der Fälle und die Plausibilitätstests deutlich weiter gefasst: Es wurden hier auch Liefermengen einbezogen, bei der Dauer der betrachteten Verbrauchszeiträume wurden großzügige Abweichungen von der Jahresperiode zugelassen (365  $\pm$  200 Tage), ein Mindestabstand nach Fertigstellung der Modernisierungsmaßnahmen war nicht mehr einzuhalten. Bei Bedarf und Verbrauch wurden auch sehr hohe Werte bis 600 kWh/m<sup>2</sup>a zugelassen, ausgehend vom ursprünglichen Energiebedarf wurde durch die Verbrauchswerte ein Überschreiten bis zum Faktor 4 und ein Unterschreiten bis zum Faktor  $\frac{1}{4}$  zugelassen.

Insgesamt ergaben sich damit 662 auswertbare Fälle für Variante 2, davon 487 Ein-/Zweifamilienhäuser und 175 Mehrfamilienhäuser ab drei Wohnungen. Die Gebäude verteilen sich wie folgt auf die verschiedenen Energieträger: Elektrischer Strom: 34 Fälle (blau), Erdgas: 375 Fälle (rot), Flüssiggas: 1 Fall (ebenfalls rot), Heizöl: 169 Fälle (schwarz), Holz/Holzpellets: 56 Fälle (grün), Fernwärme: 27 Fälle (braun). Gegenüber Variante 1 ist hier neben einer generellen Zunahme der Fallzahlen vor allem – bedingt durch die Zunahme der Auswertung von Liefermengen – ein Zuwachs bei Heizöl und Holz/Pellets zu verzeichnen.

Die Regressionskoeffizienten für Variante 2 nehmen die folgenden Werte ein:

$$c_0 = -0,1863 \pm 0,1386$$

$$c_1 = 0,9660 \pm 0,0266$$

Die Ausgleichsfunktion von Variante 2 lautet damit:

$$q_{B,V} = 0,8300 q_B^{0,9660}$$

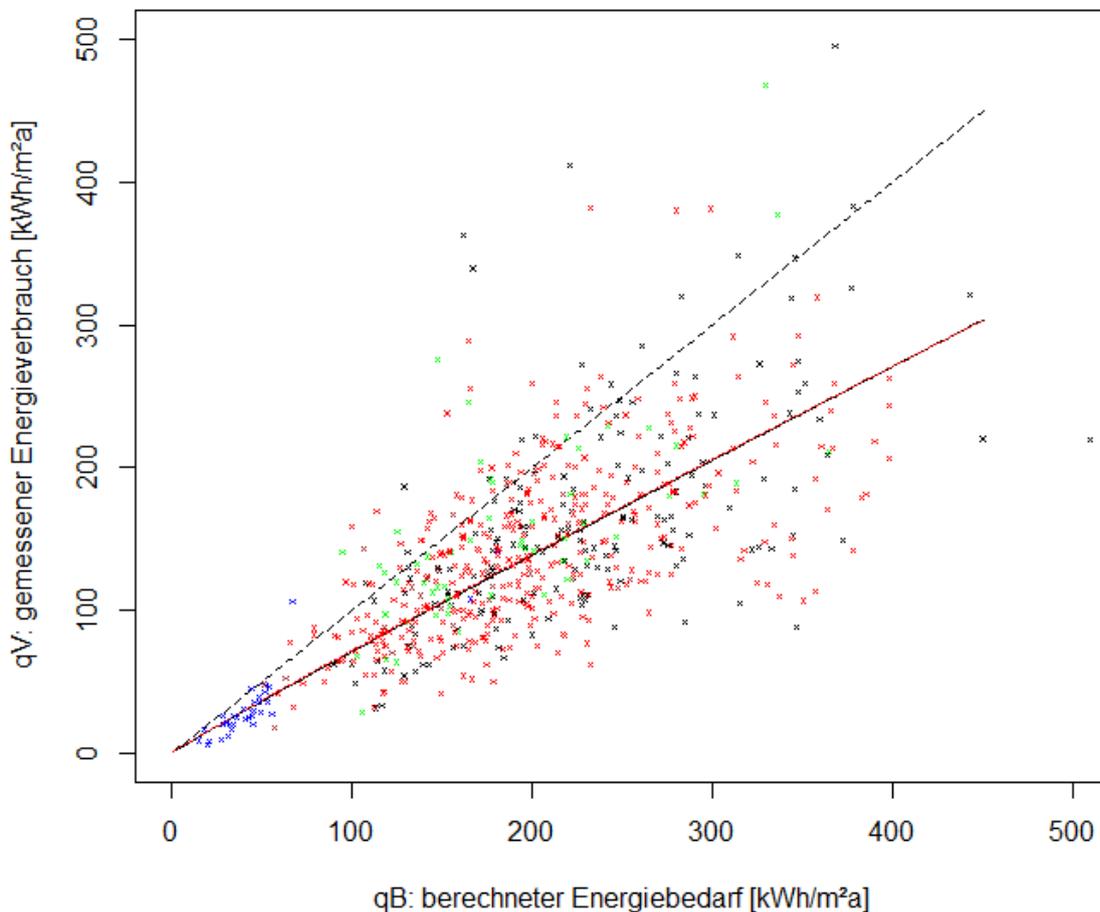
Abbildung 3 zeigt die Einzelwerte und die Anpassungsfunktion für die Variante 2. Außerdem ist als rote punktierte Linie die oben genannte Anpassungsfunktion der Variante 1 eingetragen.

Es zeigt sich, dass der Kurvenverlauf in beiden Varianten fast identisch ist: Die Linien liegen quasi übereinander. Diese auffällig genaue Übereinstimmung kann ein Stück weit als zufällig angesehen werden und ist beispielsweise vor dem Hintergrund der ohnehin gegebenen statistischen Unsicherheiten der Regressionskoeffizienten (s. deren Standardfehler) zu relativieren. Immerhin zeigt sich hier offenbar eine gewisse Robustheit der Auswertung im Hinblick auf das generelle Hinzunehmen bzw. Weglassen von Datensätzen mit unsicherer Datenlage.

---

<sup>16</sup> Vergleiche hierzu [Hörner et al. 2016].

Für weitere Untersuchungen wird im Folgenden die Variante 2 mit der größeren Fallzahl verwendet. Diese definiert die Anpassungsfunktion für die SEP-Bilanzmethode.



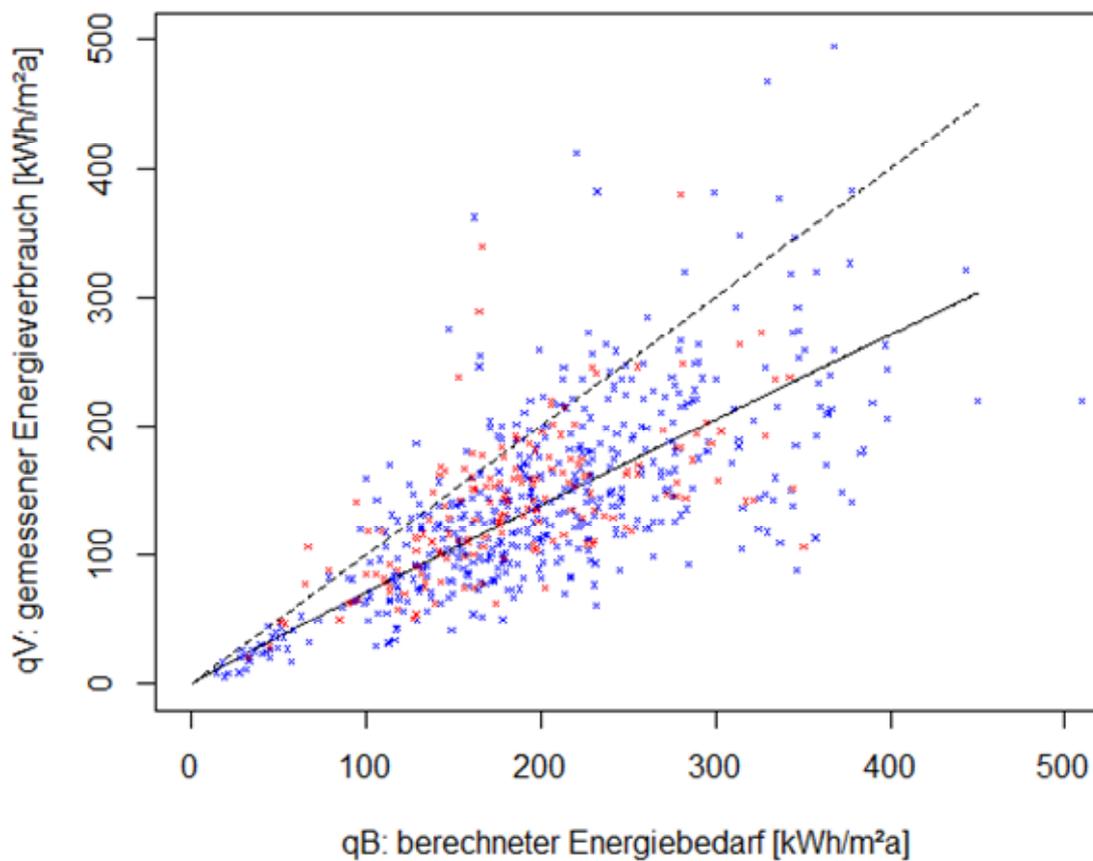
**Abbildung 3** Energiebilanzverfahren „Energieeffizient Sanieren“ (SEP-Verfahren): Berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für den Haupt-Energieträger – Variante 2: erweiterte Fallzahl (662 Gebäude)

Werte bezogen auf die beheizte Wohnfläche,  
 bei Brennstoffen: Angabe des Brennwertes (oberer Heizwert)  
 blau: elektrischer Strom, rot: Erdgas/Flüssiggas, schwarz: Heizöl,  
 grün: Holz/Holzpellets, braun: Fernwärme  
 gestrichelte Linie: Winkelhalbierende  $q_V = q_B$ ,  
 schwarze durchgezogene Linie: Anpassungsfunktion  $q_{B,V} = f(q_B)$   
 rote gepunktete Linie: Anpassungsfunktion der Variante 1 (zum Vergleich)

Die erste Ableitung der Funktionsgleichung lautet:  $q_{B,V}' = c_1 c_2 q_B^{(c1-1)} = 0,820 q_B^{-0,034}$

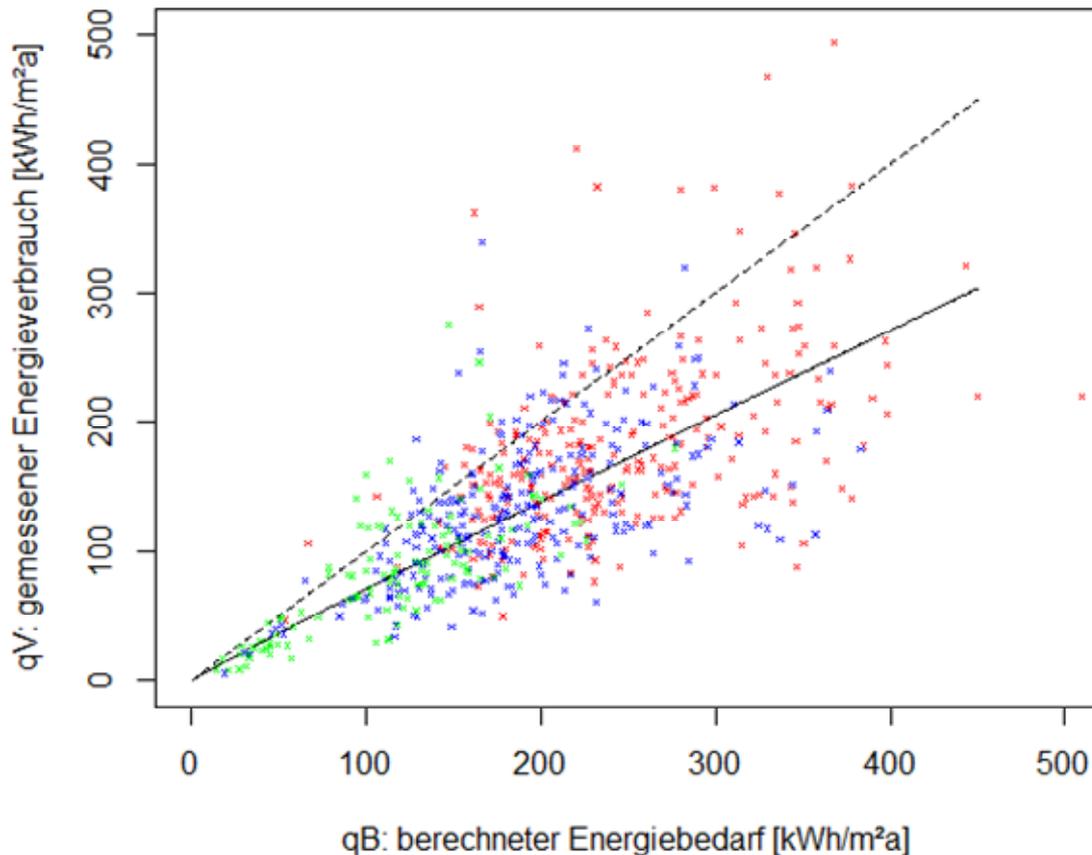
Sie gibt die Steigung der Kurve an. Diese verändert sich aufgrund der geringen Kurvenkrümmung nur wenig mit  $q_B$  und sinkt beispielsweise von rund 0,7 bei  $q_B = 50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  allmählich bis ungefähr 0,65 bei  $q_B = 500 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Die Steigung liegt damit grob gesprochen um ein Drittel unter der Steigung der Winkelhalbierenden (Wert 1,0).

In Abbildung 4 und Abbildung 5 sind die Werte von Abbildung 3 noch einmal dargestellt, nun aber differenziert nach Gebäudeart (Ein-/Zweifamilienhäuser: 487 Fälle, Mehrfamilienhäuser: 175 Fälle) bzw. Erhebungsgruppe (Erhebungsgruppe A: 274 Fälle, B mit Einzelmaßnahmenförderung: 265 Fälle, B mit Effizienzhausförderung: 123 Fälle),



**Abbildung 4 Energiebilanzverfahren „Energieeffizient Sanieren“ (SEP-Verfahren), wie  
Abbildung 3, aber Darstellung nach Gebäudeart**  
blau: Ein-/Zweifamilienhäuser (EZFH)  
rot: Mehrfamilienhäuser (MFH)

Abbildung 4 zeigt, dass sich die Bereiche des Energiebedarfs und -verbrauchs von Ein-/Zweifamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern weitgehend überlappen. Im Bereich sehr hoher Energiekennwerte dominieren allerdings die Ein-/Zweifamilienhäuser, ebenso – da Wärmepumpen bei diesem Gebäudetyp häufiger eingesetzt werden – im Bereich der sehr niedrigen Energiekennwerte.



**Abbildung 5 Energiebilanzverfahren „Energieeffizient Sanieren“ (SEP-Verfahren), wie Abbildung 3, aber Darstellung nach Erhebungsgruppen**  
 rot: Erhebungsgruppe A (vor Modernisierung)  
 blau: Erhebungsgruppe B (nach Modernisierung): Einzelmaßnahmen grün: Erhebungsgruppe B (nach Modernisierung): Effizienzhäuser

In Abbildung 5 finden sich die Fälle der Erhebungsgruppe A (vor Modernisierung) erwartungsgemäß weitgehend im Bereich der hohen und höchsten Verbrauchs- und Bedarfswerte wieder, allerdings mit großen Überschneidungen zu den Fällen der Erhebungsgruppe B (nach Modernisierung)<sup>17</sup>. Die geförderten Effizienzhäuser liegen vorwiegend im Bereich der niedrigsten Energiekennwerte.

Insgesamt liegt mit den dargestellten Ergebnissen ein Verfahren vor, das in zukünftigen Anwendungen mit Hilfe der Ausgleichsfunktion von Variante 2 eine Kalibrierung der Energiebilanz nach dem SEP-Verfahren an realistische Verbrauchswerte ermöglicht.

Im Folgenden werden entsprechende Analysen für das Energiebilanzverfahren nach Energieeinsparverordnung bzw. Energieausweis sowie ein Vergleich mit dem SEP-Verfahren durchgeführt.

<sup>17</sup> Vergleiche hierzu die Erläuterungen in Kapitel 4.1.

## 4.3 Analyse des Verfahrens gemäß Energieeinsparverordnung / Energieausweis

### 4.3.1 Vergleich von EnEV-Bilanzierungsmethode und SEP-Verfahren

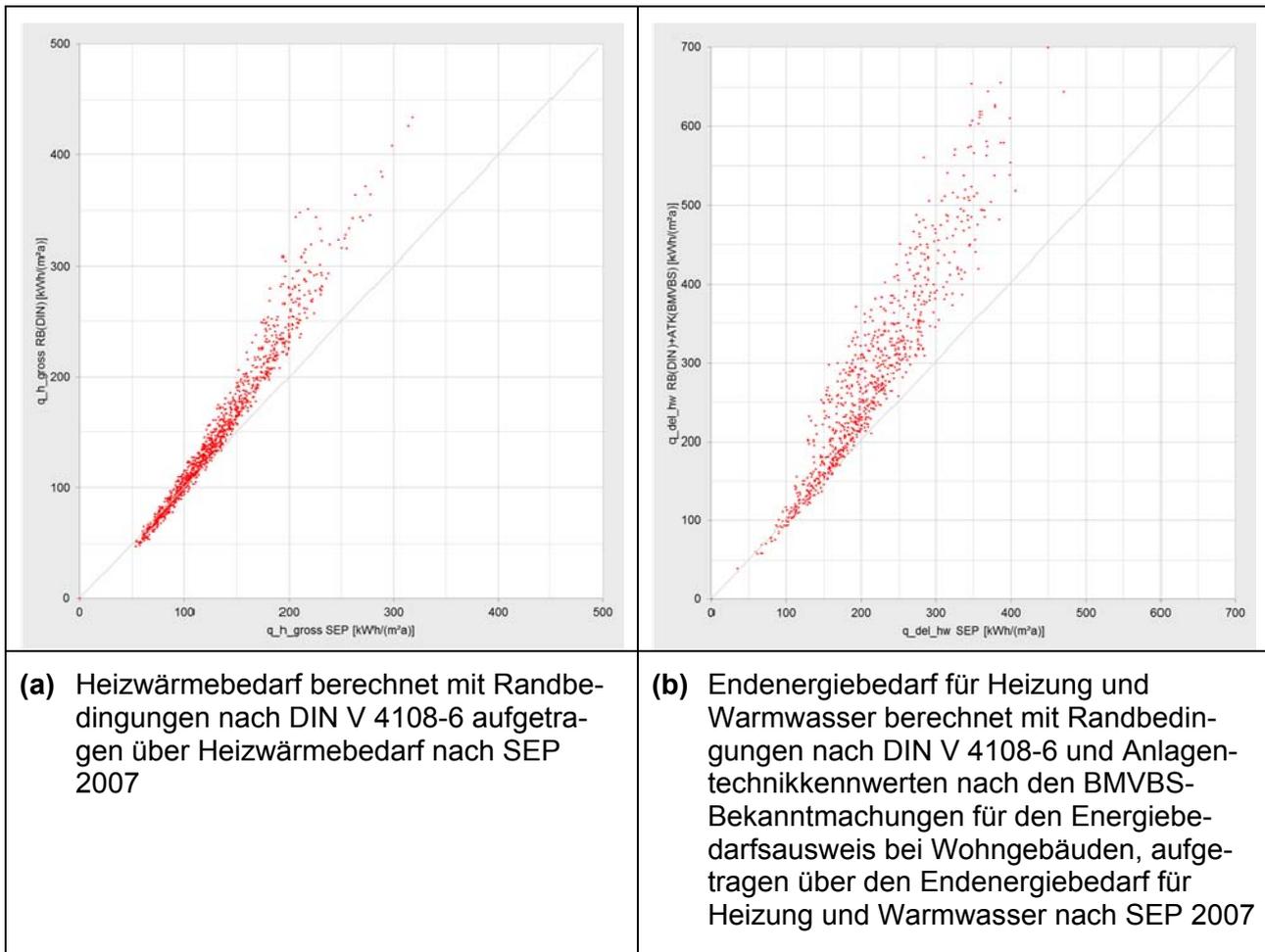
Das SEP-Verfahren, das vom IWU in den vergangenen Jahren beim Monitoring des Programms „Energieeffizient Sanieren“ angewendet wurde, lehnt sich stark an das der EnEV zu Grunde liegende Verfahren nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 an, verwendet aber an einigen Stellen abweichende Berechnungsansätze. Diese wurden insbesondere mit dem Ziel eingeführt, realistischere Ergebnisse für den Energiebedarf zu erhalten. Insbesondere sind die folgenden Ansätze betroffen (vgl. auch z. B. [Diefenbach et al. 2018, Anlage 4]):

- mittlere Raumtemperatur: Es werden die Effekte der räumlichen Teilbeheizung sowie ein „Nutzungsfaktor“ berücksichtigt:  
Eine räumlich eingeschränkte Beheizung wird abhängig vom Gebäudestandard und von der mittleren Wohnungsgröße des Gebäudes angesetzt (je höher die Wärmeverluste und je größer die Wohnfläche pro Wohnung, desto stärker die Reduktion der Raumtemperatur). Dies berücksichtigt, dass bei größeren Wohnungen mehr Räume teilweise nicht oder nur geringfügig direkt beheizt werden.  
  
Damit und durch die zusätzliche Anwendung des in [Loga et al. 2003] definierten „Nutzungsfaktors“, der eine auf Grund der hohen Heizkosten bei unsanierten Altbauten geringere Nutzungsintensität ansetzt, liegt die in der Bilanzierung effektiv angesetzte mittlere Temperatur in der Heizzeit für schlecht gedämmte Gebäude bei 15 °C bis 17 °C Raumtemperatur, für gut gedämmte Gebäude bei 19 °C bis 21 °C.
- Wärmeverluste Anlagentechnik: Anstelle der Pauschalwerte der Bekanntmachungen des Bundes werden die Ansätze des Kurzverfahrens Energieprofil [Loga et al. 2005] verwendet, die insbesondere den Verteilleitungen im Bestand deutlich niedrigere Wärmeverlust-Kennwerte zuordnen.

Die in Kapitel 4.2 dokumentierte Analyse des SEP-Verfahrens vor dem Hintergrund der Verbrauchserhebung hat eine relevante Abweichung von Bedarf und Verbrauch und ein entsprechender Korrekturbedarf festgestellt. Angesichts der veränderten Berechnungsansätze beim SEP-Verfahren, die der beobachteten Verbrauchsüberschätzung bei unsanierten Gebäuden eher entgegenwirken, besteht allerdings die Vermutung, dass diese Abweichung beim „offiziellen“ Verfahren nach EnEV/Energieausweis entsprechend noch stärker ausfallen müsste.

Um dies genauer zu untersuchen, wurden die Auswertungen – mit der aktuellen Untersuchung abgewandelt – noch einmal durchgeführt. Dabei wurden die oben genannten veränderten Randbedingungen wieder an die Ansätze der DIN V 4108-6 bzw. 4701-10 angeglichen und die Anlagentechnik-Kennwerte der BMVBS-Bekanntmachungen verwendet.

Abbildung 6 zeigt hier den direkten Vergleich der Berechnungsergebnisse zwischen beiden Verfahren.



**Abbildung 6**    **Auswirkung einer Änderung der beim Monitoring angewendeten „SEP 2007“-Bilanzierung in Richtung EnEV-Nachweis (DIN V 4108-6 / 4701-10 und EnEV-Bekanntmachungen) - Zusammenhang mit dem SEP-Verfahren**  
 Werte beider Achsen bezogen auf die beheizte Wohnfläche,  
 bei Brennstoffen: Angabe des Brennwertes (oberer Heizwert)

Werden für die Randbedingungen der Bilanzierung anstelle der SEP-Werte die nach DIN V 4108-6 verwendet, ergibt sich der in Abbildung 6 a) abgebildete Zusammenhang zwischen der EnEV-nahen Bilanzierung und dem SEP-Verfahren für den Heizwärmebedarf. Werden darüber hinaus bei der Anlagentechnik die pauschalen Wärmeverlustkennwerte der Wärmeverteilung entsprechend dem Schema nach DIN 4701-10 und den Regeln der BMVBS-Bekanntmachungen vom 7. April 2015 verwendet, ergibt sich der in Abbildung 6 b) dargestellte Zusammenhang für den Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser (Erdgas und Heizöl).

Sowohl für den Heizwärmebedarf als auch für den Endenergiebedarf Heizung und Warmwasser liegen die EnEV-nahen Rechenwerte systematisch höher, und zwar vor allem bei hohen Werten des Heizwärme- bzw. Endenergiebedarfs.

#### 4.3.2 Analyse der Energiebilanz mit EnEV-Randbedingungen vor dem Hintergrund der empirisch erhobenen Energieverbräuche

Neben dem zuvor beschriebenen Vergleich der Berechnungsansätze ließ sich auch ein direkter Vergleich des an die EnEV-Randbedingungen angepassten Energiebilanzverfahrens mit den

Energieverbräuchen aus der aktuellen Internet-Erhebung durchführen. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse.

Die Analyse wurde mit der gleichen Methodik (Regressionsanalyse, logarithmischer Ansatz) durchgeführt, die in Kapitel 4.2 für die Ermittlung der Ausgleichsfunktionen beschrieben ist. Die Plausibilitätstests wurden entsprechend der Variante 3 (662 auswertbare Fälle) durchgeführt. Nach Angleichung an die EnEV-Randbedingungen ergeben sich hier 635 auswertbare Fälle.

Die Anpassungskurve, die sich aus der Regressionsanalyse ergibt, ist in Abbildung 7 als blaue durchgezogene Linie eingetragen. Die Regressionsparameter sind  $c_0 = 0,5467 \pm 0,1308$  und  $c_1 = 0,7929 \pm 0,0241$ . Die zugehörige Funktionsgleichung lautet:

$$q_{B,V} = 1,7275 q_B^{0,7929}$$

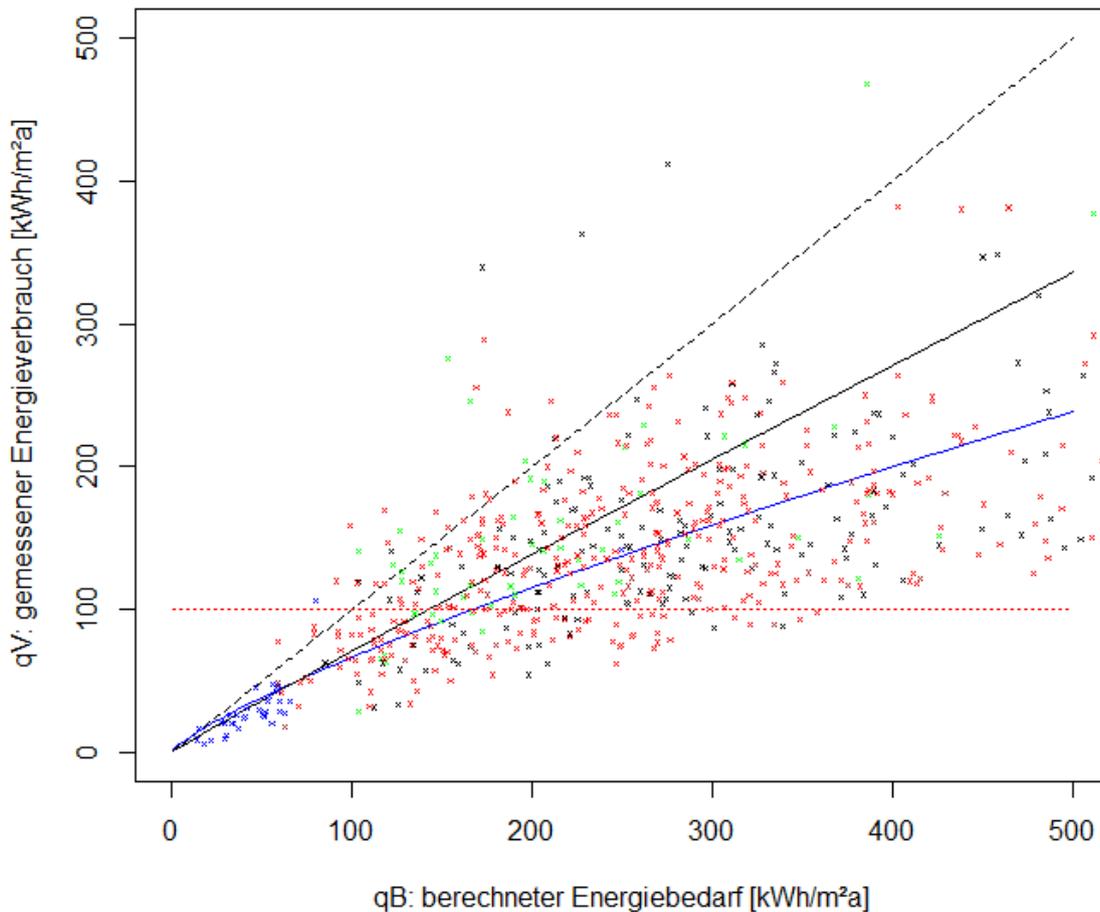
Zum Vergleich ist als schwarze durchgezogene Linie auch die Funktionsgleichung des SEP-Verfahrens nach Abbildung 3 eingezeichnet<sup>18</sup>. Diese Linie liegt über der blauen, die Verbrauchskorrektur fällt also wie erwartet bei dem für das Monitoring angewandten SEP-Verfahren deutlich weniger stark aus als beim EnEV-Verfahren.

Beim Vergleich der beiden Abbildungen und Ausgleichsgeraden ist zu beachten, dass sich gleiche Gebäude der Stichprobe – aufgrund unterschiedlicher Energiebilanzverfahren – hinsichtlich ihrer Bedarfswerte (x-Werte) unterscheiden, während die y-Werte (Verbräuche) identisch sind. Entsprechend sind auch die Ausgleichskurven besser von der y-Achse als von der x-Achse ausgehend zu vergleichen:

Als Beispiel ist hier in Form einer rot gepunkteten Kurve der y-Wert 100 kWh/m<sup>2</sup>a eingetragen. Im Fall der Einzelgebäude handelt es sich dabei um den Verbrauchswert  $q_V$ , bei den Ausgleichskurven zeigt die y-Achse den korrigierten (an realistische Verbräuche) angepassten Bedarfswert  $q_{B,V}$  an. Diesem entspricht nach SEP-Verfahren ein (ursprünglich berechneter) Energiebedarf  $q_B$  von etwas mehr als ungefähr 140 kWh/m<sup>2</sup>a (x-Wert am Schnittpunkt von rot gepunkteter und schwarzer Linie). Die Anpassungskurve für das Verfahren nach EnEV (schwarze Linie) schneidet die rot gepunktete Linie dagegen deutlich weiter rechts, d. h. bei einem Bedarfswert  $q_B$  von ungefähr 170 kWh/m<sup>2</sup>.

---

<sup>18</sup> Diese passt eigentlich nicht zu den eingetragenen Punkten, da sie sich auf ein anderes Energiebedarfsverfahren und damit auf eine andere Skalierung der x-Achse bezieht.



**Abbildung 7** Energiebilanzverfahren „Energieeffizient Sanieren“ nach Anpassung an die Randbedingungen nach EnEV / Energieausweis : Berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für den Haupt-Energieträger – Fallzahl 635 Gebäude

Werte bezogen auf die beheizte Wohnfläche,  
bei Brennstoffen: Angabe des Brennwertes (oberer Heizwert)  
blau: elektrischer Strom, rot: Erdgas/Flüssiggas, schwarz: Heizöl,  
grün: Holz/Holzpellets, braun: Fernwärme  
gestrichelte Linie: Winkelhalbierende  $q_V = q_B$ ,  
blaue durchgezogene Linie: Anpassungsfunktion  $q_{B,V} = f(q_B)$   
schwarze durchgezogene Linie: Anpassungsfunktion nach SEP-  
Verfahren zum Vergleich  
rote gepunktete Linie:  $q_V$  bzw.  $q_{B,V} = 100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Allgemein betrachtet liegt die schwarze Kurve des SEP-Verfahrens über fast das gesamte Spektrum links von der blauen mit EnEV-Randbedingungen, so dass sich für das EnEV-Verfahren bei gleichen y-Werten (also auf realistische Werte korrigierten Bedarfswerten  $q_{B,V}$ ) durchweg höhere x-Werte (ursprüngliche Bedarfe  $q_B$ ) als beim SEP-Verfahren ergeben. Die stärkere Überschätzung des Verbrauchs beim Verfahren nach EnEV-Randbedingungen lässt sich also auch auf diese Weise ableiten.

Bei der Interpretation dieser Aussage ist allerdings zu beachten, dass das jeweilige Berechnungsverfahren immer auch im Kontext seiner konkreten Anwendung betrachtet werden muss. Im vorliegenden Fall wurde die Energiebilanzberechnung aufgrund der Angaben in einem (Internet)-Fragebogen mit – im Vergleich zu den Algorithmen DIN V 4108-6 und 4701-10 – vereinfachten Be-

rechneralgorithmen durchgeführt, bei denen für nicht genau erfasste Parameter zum Teil pauschale Standardwerte angenommen werden mussten. Eine Gebäudeaufnahme vor Ort wie bei der Erstellung eines Energiebedarfsausweises konnte nicht durchgeführt werden, ebenso wenig eine Aufnahme der Bauteilflächen der thermischen Gebäudehülle, für die hier nur ein – empirisch begründetes – Schätzverfahren angesetzt wurde (vgl. [Loga et al. 2005]).

Ein solches Vorgehen entspricht der vorliegenden Aufgabenstellung, da ja auch beim Monitoring die Energiebilanz lediglich auf Grundlage eines Fragebogens ermittelt wurde, der von den Gebäudeeigentümern ausgefüllt worden war. Dennoch ist natürlich von Interesse, welche Ergebnisse sich im Fall einer tatsächlichen Erstellung von Energieausweisen ergeben würden. Da für eine Teilstichprobe Energieausweisdaten vorhanden waren und bei der Internetbefragung auch mit erhoben wurden, kann diese Fragestellung im nächsten Abschnitt untersucht werden.

### 4.3.3 Verbrauchsabgleich von Energiebedarfsausweisen auf Basis der aktuellen Erhebung

Ausgehend von den 662 Gebäuden der Untersuchungsvariante 3 (s. Kap.4.2) wurden diejenigen Fälle untersucht, bei denen Angaben zum Endenergiebedarf aus dem Energieausweis vorlagen. Mit diesen wurde nach dem gleichen Schema wie in den bisherigen Analysen eine Anpassungsrechnung für den Energiebedarf des Haupt-Energieträgers an den tatsächlichen Verbrauch durchgeführt. Von zunächst 101 Fällen mit Angaben im Energieausweis blieben nach individueller Sichtung der Angaben (mit Aussortieren von unplausiblen, unvollständigen bzw. unklaren<sup>19</sup> Fällen) sowie den automatischen Plausibilitätstests 71 Fälle für die Analyse übrig. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse nach Umrechnung der Energieausweisdaten auf den oberen Heizwert (bei Brennstoffen) und die beheizte Wohnfläche (statt der Gebäudenutzfläche  $A_N$ ), die auch in den anderen Abbildungen im vorliegenden Kapitel 4 verwendet wurden.

Von den 71 auswertbaren Fällen gehören 9 zur Erhebungsgruppe A („vor Modernisierung“) und 62 zur Gruppe B („nach Modernisierung“). Es wird aber insgesamt ein breites Energiebedarfsspektrum auch mit höheren Werten abgebildet, d. h. bei den Fällen der Gruppe B handelt es sich offensichtlich nicht ausschließlich um weitgehende Gesamtmodernisierungen. Die Dichte der Punkte im Bereich geringerer Energiebedarfe ab etwa 100 kWh/m<sup>2</sup>a ist allerdings merklich höher.

Innerhalb der auswertbaren Teilstichprobe gab es in 50 Fällen verwertbare Angaben zum angewendeten Energiebilanzverfahren: In 48 Fällen wurde das Verfahren nach DIN V 4108-6 / 4701-10 genannt, das hier also stark dominiert, während das Verfahren nach DIN V 18599 nur in 2 Fällen angegeben wurde.

Die Ausgleichskurve für die Energiebedarfswerte aus den Energieausweisen ist in Abbildung 8 als grüne Linie eingetragen.

Die Regressionsparameter sind  $c_0 = 0,9068 \pm 0,3279$  und  $c_1 = 0,7550 \pm 0,0683$ . Die Funktionsgleichung lautet damit:

$$q_{B,V} = 2,476 q_B^{0,755}$$

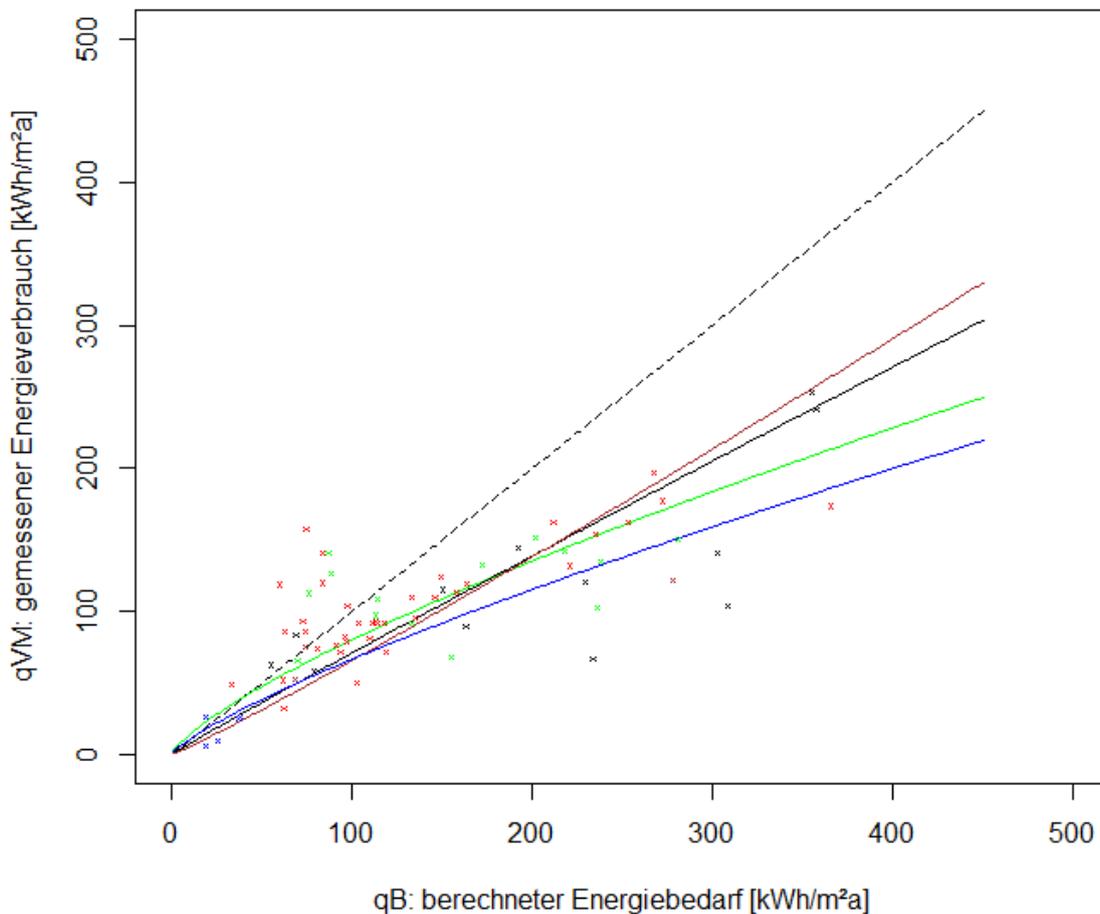
Ebenfalls in die Abbildung eingetragen sind weitere Kurven, die nicht unmittelbar zu den dargestellten Punkten passen, aber für den Vergleich mit der Ausgleichskurve herangezogen werden:

Bei zwei der Kurven handelt es sich wiederum um die beiden mit der kompletten Stichprobe ermittelten Ausgleichsfunktionen aus Abbildung 3 bzw. Abbildung 7, nämlich die Kurve nach dem SEP-Verfahren im Original (durchgezogene schwarze Linie) bzw. nach Anpassung der Randbedingungen an die EnEV (durchgezogene blaue Linie).

---

<sup>19</sup> Wie bei der Analyse von Neubau-Energieausweisen (siehe Kap. 5.3) wurden beispielsweise auch hier Fälle mit elektrischem Strom als Haupt-Energieträger und gleichzeitig installierter Photovoltaikanlage aussortiert, da die Verrechnung des Photovoltaik-Stroms im Energieausweis hier nicht sicher geklärt werden konnte.

Weiterhin eingetragen ist eine braune Linie: Diese markiert die Anwendung des SEP-Verfahrens (im Original, d. h. ohne Anpassung an EnEV-Bedingungen) für die reduzierte Stichprobe mit 71 Fällen<sup>20</sup>.



**Abbildung 8 Endenergiebedarf nach Energieausweis („Energieeffizient Sanieren“): Berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für den Haupt-Energieträger – Fallzahl 71 Gebäude**

Werte bezogen auf die beheizte Wohnfläche,  
 bei Brennstoffen: Angabe des Brennwertes (oberer Heizwert)  
 blau: elektrischer Strom,  
 rot: Erdgas/Flüssiggas, schwarz: Heizöl,  
 grün: Holz/Holzpellets, braun: Fernwärme  
 gestrichelte Linie: Winkelhalbierende  $q_V = q_B$ ,  
 grüne Linie: Anpassungsfunktion  $q_{B,V} = f(q_B)$   
 braune Linie: Anpassungsfunktion nach SEP für die gleiche Teilstichprobe  
 schwarze und blaue Linie: Anpassungsfunktionen nach SEP-Verfahren  
 (schwarz) bzw. Anpassung an EnEV-Randbedingungen (blau) für die  
 Bedarfsberechnung mit vollständiger Stichprobe (gleiche Kurven wie in  
 Abbildung 7)

Der Vergleich der grünen und blauen Linie zeigt, dass die (grüne) Anpassungskurve für die Energieausweise weiter oberhalb (aus Sicht der x-Achse) bzw. weiter links (aus Sicht der y-Achse)

<sup>20</sup> Die Regressionsparameter lauten hier  $c_0 = -0,7575 \pm 0,3457$  und  $c_1 = 1,0731 \pm 0,0702$ . Die Funktionsgleichung ist:  
 $q_{B,V} = 0,468 q_B^{1,0731}$

liegt, die Verbrauchskorrektur der Energieausweisberechnung also nicht ganz so stark ausfällt wie die Verbrauchskorrektur des an die EnEV- bzw. Energieausweis-Randbedingungen angepassten Berechnungsverfahrens. Andererseits ist aber auch festzustellen, dass die beiden Kurven nicht weit auseinanderliegen und insbesondere über weite Bereiche eine ähnliche Steigung aufweisen.

Der Vergleich der grünen mit der schwarzen Linie zeigt, dass die aus den Energieausweisen abgeleitete grüne Kurve im Bereich höherer Bedarfs- bzw. Verbrauchswerte unterhalb bzw. weiter rechts liegt. In diesem Bereich fällt also die Korrektur der Energieausweisdaten stärker aus als die des SEP-Verfahrens, während dies bei geringeren Bedarfen umgekehrt ist. Die Steigung ist bei der schwarzen „SEP“-Kurve allerdings fast durchgehend stärker.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Vergleich der grünen mit der braunen Linie: Dadurch, dass die Analyse nach dem SEP-Verfahren auf die deutlich kleinere Stichprobe eingeschränkt wurde (Übergang von der schwarzen Linie basierend auf 662 Fällen zur braunen mit 71 Fällen), hat sich der Verlauf der Anpassungskurve nicht wesentlich verändert. Entsprechend fällt auch der Vergleich des SEP-Verfahrens mit den Energieausweis-Daten, der nunmehr in beiden Fällen auf der identischen Stichprobe von 71 Fällen basiert, quasi gleich aus.

Zusammenfassend lässt sich also Folgendes festhalten: Die Verbrauchskorrektur aufgrund der konkret vorliegenden Energiebedarfsausweis-Daten fällt schwächer aus als die Anpassung der Energiebedarfswerte, die aus den Fragebogendaten zu Gebäude und Heizsystem mit dem an die EnEV angepassten Berechnungsverfahren ermittelt wurden. Im Vergleich zum Bedarfsberechnungsverfahren nach SEP (so wie es beim Monitoring angewendet wurde, d. h. ohne EnEV-Anpassung) ist bei den Energieausweisen für höhere Energieverbräuche eine stärkere, für niedrige Werte dagegen eine schwächere Verbrauchskorrektur notwendig.

## 5 Untersuchung von gemessenen und berechneten Energieverbräuchen im Neubau

### 5.1 Endenergieverbräuche im Überblick

Tabelle 3 zeigt die für die ausgewerteten Fälle<sup>21</sup> der Verbrauchsstichprobe mittleren gemessenen Energieverbräuche unterschiedlicher Neubau-Standards nach Energieträgern (Angabe für den Haupt-Energieträger). Wie auch im gesamten Kapitel 5 wird hier im Fall von Brennstoffen der (untere) Heizwert angegeben, und als Bezugsfläche dient die Gebäudenutzfläche  $A_N$ , die auch beim EnEV-Nachweis von Neubauten verwendet wird. Diese ist im Allgemeinen deutlich größer als die Wohnfläche.

Die Effizienzhausstandards sind mit Abkürzungen angegeben, beispielsweise steht die Bezeichnung „EH 40“ für das KfW-Effizienzhaus 40.

**Tabelle 3** Durchschnittliche gemessene Endenergieverbräuche verschiedener Neubaustandards im Überblick (Haupt-Energieträger)

| gemessener Endenergieverbrauch (Mittelwerte)  |            |           |           |          |           |
|---|------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| in kWh/m <sup>2</sup> a bezogen auf die Gebäudenutzfl. $A_N$ , bei Brennstoffen: (unterer) Heizwert |            |           |           |          |           |
|   |            | Fernwärme | Erdgas    | Strom    | Biomasse  |
| alle Gebäude  | Fallzahl   | 10        | 38        | 61       | 33        |
|   | Mittelwert | 47 +/- 18 | 55 +/- 20 | 17 +/- 7 | 49 +/- 31 |
| EH 85   | Fallzahl   |           | 7         | 2        |           |
|   | Mittelwert |           | 64 +/- 0  | 29 +/- 6 |           |
| EH 70   | Fallzahl   | 3         | 17        | 14       | 6         |
|   | Mittelwert | 59 +/- 8  | 59 +/- 12 | 16 +/- 5 | 69 +/- 45 |
| EH 55   | Fallzahl   | 1         | 8         | 23       | 12        |
|   | Mittelwert | NA        | 44 +/- 13 | 19 +/- 9 | 44 +/- 20 |
| EH 40   | Fallzahl   | 5         | 2         | 16       | 14        |
|   | Mittelwert | 34 +/- 14 | 14 +/- 4  | 16 +/- 6 | 43 +/- 30 |

Geringe Fallzahlen unter 20 sind blau markiert und verkleinert dargestellt: Hier sind die Ergebnisse nur begrenzt aussagekräftig, dies betrifft die meisten Ergebnisse der Tabelle.

Insofern ist aus dieser Übersichtstabelle lediglich abzulesen, dass die Verbrauchsniveaus auf den ersten Blick plausibel erscheinen: Der Energieverbrauch nimmt vom Effizienzhaus 85 in Richtung auf das Effizienzhaus 40 als ehrgeizigsten Standard in der Tendenz ab und ist beim Strom (der in der Regel in elektrischen Wärmepumpen eingesetzt wird) am geringsten.

<sup>21</sup> Erläuterungen zu den Einschränkungen der Stichprobe durch Plausibilitätstests siehe folgende Abschnitte.

## 5.2 Anpassung der Ansätze zum elektrischen Hilfsenergiebedarf

Das vom IWU angewendete Bilanzverfahren für das Monitoring der Neubauten im Programm „Energieeffizient Bauen“ basiert weitgehend auf den Angaben aus dem Energieausweis, insbesondere zum Primärenergiebedarf. Für die Rückrechnung auf den Endenergieeinsatz des jeweiligen Haupt-Energieträgers sind dabei ergänzende Annahmen zum elektrischen Hilfsenergiebedarf notwendig<sup>22</sup>.

Daher wird hier in einem ersten Schritt – vor der weiteren Auswertung der Energieverbrauchsdaten der hauptsächlich eingesetzten Energieträger in den folgenden Kapiteln – eine Analyse der in der Internetbefragung erhobenen Hilfsstrom-Angaben aus den Energieausweisen durchgeführt.

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse wurden die Hilfsstrombedarfe im Energieausweis wie folgt untersucht:

$$Q_{HE,EA} = c_0 + c_1 \bar{\delta}_{Solar} + c_2 \bar{\delta}_{LWRG}$$

$Q_{HE,EA}$ : Hilfsstrombedarf in kWh/m<sup>2</sup>a (angepasst an die Angaben im Energieausweis)

$\bar{\delta}_{Solar}$ : Indikator für eine thermische Solaranlage (1: vorhanden, 0: nicht vorhanden)

$\bar{\delta}_{LWRG}$ : Indikator für eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Die drei Regressionskoeffizienten können als Basiswert für den Hilfsstrombedarf ( $c_0$ ) und Zuschläge bei Vorhandensein einer thermischen Solaranlage ( $c_1$ ) bzw. einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ( $c_2$ ) interpretiert werden.

Das Ergebnis der Analyse, die mit insgesamt 104 auswertbaren Fällen<sup>23</sup> durchgeführt werden konnte, lautet:

$$c_0 = (3,13 \pm 0,23) \text{ kWh/m}^2\text{a}$$

$$c_1 = (0,15 \pm 0,27) \text{ kWh/m}^2\text{a}$$

$$c_2 = (0,91 \pm 0,27) \text{ kWh/m}^2\text{a}$$

Vor diesem Hintergrund wurden die bisherigen auf pauschalen Annahmen basierenden Modellansätze (2,5 kWh/m<sup>2</sup>a Basiswert, Zuschläge 1,5 kWh/m<sup>2</sup>a für Solarthermie, 2,5 kWh/m<sup>2</sup>a für Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und 1,2 kWh/m<sup>2</sup>a für Abluftanlage) angepasst, und zwar leicht gerundet gegenüber den Regressionsergebnissen auf:

|   |                           |
|---|---------------------------|
| Basiswert:                              | 3,0 kWh/m <sup>2</sup> a  |
| Zuschlag Solarthermieanlage:            | +0,2 kWh/m <sup>2</sup> a |
| Zuschlag Lüftungsanlage <sup>24</sup> : | +1,0 kWh/m <sup>2</sup> a |

Diese Ergebnisse lassen sich insbesondere angesichts der relativ kleinen Stichprobe und der damit verbundenen Stichprobenfehler nicht als genereller empirisch begründeter Ansatz für die Höhe des Hilfsstrombedarfs interpretieren. Für das vorliegende Verfahren dienen sie aber zur besseren Abstimmung der Modellkennwerte mit den zu Grunde liegenden Energieausweisdaten und werden daher in den folgenden Analysen zur Weiterentwicklung des Bilanzverfahrens berücksichtigt. Der Einfluss der Hilfsstromansätze auf die Gesamtbilanz ist dabei insgesamt als gering anzusehen.

<sup>22</sup> Zur genaueren Erläuterung des Verfahrens siehe z. B. N. Diefenbach, B. Stein, T. Loga, M. Rodenfels, J. Gabriel, K. Jahn: Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2015, Institut Wohnen und Umwelt, 11. November 2016, darin: Anlage 4, Kapitel 3

<sup>23</sup> Dabei ist generell anzumerken, dass die hierfür ausgewerteten Angaben der Tabelle „Endenergiebedarf“ aus dem Energieausweis bzw. deren Übertragung in den Internetfragebogen mit Unsicherheiten verbunden sind und hier viele Fälle ausgenommen werden mussten, da z. B. elektrische Hilfsenergien beim Ausfüllen offenbar teilweise nicht übertragen wurden. Vor diesem Hintergrund erscheinen die Tabellenwerte auch für eine Abfrage in einem Papierfragebogen und die Anwendung beim jährlichen Monitoring des Programms generell als nicht gut geeignet.

<sup>24</sup> Dieser wird generell für Lüftungsanlagen verwendet, Anlagen ohne Wärmerückgewinnung (in der Regel Abluftanlagen) ließen sich mangels Untersuchungsfällen nicht sinnvoll analysieren.

### 5.3 Analyse von berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch

Bei der Analyse des beim Monitoring im Programm „Energieeffizient Bauen“ angewendeten Bilanzverfahrens sind besondere Bedingungen zu beachten, die die Auswertung im Vergleich zu den Analysen der Bestandsgebäude in Kapitel 4 erschweren:

- Die Streuung der Werte (relativ zur Höhe des Energiebedarfs und -verbrauchs betrachtet) erscheint hier tendenziell höher als im Bestand, insbesondere bei den höchsten Effizienzstandards. Ein wesentlicher Grund liegt wahrscheinlich darin, dass sich hier unterschiedliches Nutzerverhalten (z. B. beim Warmwasserverbrauch oder beim Lüftungsverhalten) angesichts des niedrigeren Verbrauchsniveaus relativ gesehen stärker auswirkt. Für empirische Auswertungen sind daher besonders hohe Fallzahlen anzustreben.
- Demgegenüber sind allerdings bei den Auswertungen zu dem bisher angewendeten Bilanzverfahren die Fallzahlen deutlich eingeschränkt: Die Bilanzierung baut – anders als im Programm „Energieeffizient Sanieren“ – nicht auf einem Modell auf, das die Gebäudeeigenschaften abbildet, sondern nutzt die Angaben aus dem Energiebedarfsausweis, insbesondere den Primärenergiebedarf, zum Teil auch den Transmissionswärmeverlust. Ähnlich, wie regelmäßig beim jährlichen Monitoring festzustellen war, wurde auch hier die Zahl der auswertbaren Fälle durch fehlende Angaben zum Energieausweis stark eingeschränkt: Von ursprünglich 595 Fällen der Erhebungsgruppe C, die den Fragebogen zu Ende ausgefüllt hatten, bleiben lediglich 286 Fälle übrig, in denen die notwendigen Mindestangaben (Primärenergiekennwert und Gebäudenutzfläche  $A_N$ ) aus dem Energieausweis vorlagen.
- Bei den verbliebenen Gebäuden liegt 89mal eine Photovoltaikanlage vor, darunter bei 53 Fällen, in denen der Haupt-Energieträger Strom ist (in der Regel also über eine elektrische Wärmepumpe geheizt wird). In diesen Fällen ist mit dem gewählten Bilanzansatz ein Vergleich mit Verbrauchswerten kaum möglich, da die Stromerzeugung der Photovoltaik mit den Primärenergie- und (für Strom) den Endenergiekennwerten im Energieausweis verrechnet werden kann. Gleichzeitig ist nicht bekannt, ob und in welcher Höhe dies im Einzelfall geschehen ist. Aus diesem Grund wurden die Gebäude mit Haupt-Energieträger Strom und Photovoltaik generell, die verbleibenden Gebäude mit Photovoltaik fallweise aus der Untersuchung ausgeschlossen, so dass letztlich nur 197 bzw. 233 Fälle für die weitere Auswertung übrig blieben.

Vor diesem Hintergrund wurden die weiteren Grenzen für die Einschränkung der Untersuchungsfälle von vornherein eher großzügig (in Anlehnung an die Variante 2 in Kapitel 4.2) gewählt, so dass hier, anders als im Bestand, auch nur eine Variante betrachtet wurde. Allerdings wurde die Einhaltung eines zeitlichen Abstands der ausgewerteten Verbrauchsperioden von mindestens 250 Tagen zur Fertigstellung des Neubaus hier immer angesetzt, um die Periode des „Trockenheizens“ bei Neubauten weitgehend auszuschließen. Speziell bei Fällen mit elektrischem Strom als Haupt-Energieträger (in der Regel mit elektrischen Wärmepumpen) war zu beachten, dass ein Teil des Hilfsstromeinsatzes bei der Verbrauchsmessung miterfasst wurde. Hierzu fanden sich Abfragen im elektronischen Fragebogen, so dass die Bedarfsberechnung entsprechend angepasst, der Hilfsstrombedarf also überschlägig anteilig mitberücksichtigt werden konnte.

Ausgehend von 233 Untersuchungsfällen gehen durch die verschiedenen Einschränkungen und Plausibilitätstests noch einmal 92 Fälle verloren, so dass am Ende 141 Gebäude für die Auswertung zur Verfügung standen<sup>25</sup>. Dabei handelt es sich um 116 Ein-/Zweifamilienhäuser und 25 Mehrfamilienhäuser (ab 3 Wohnungen). Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse.

---

<sup>25</sup> Die meisten Fälle hiervon (75) wurden aufgrund von Plausibilitätstests bei der Energiebedarfsberechnung ausgeschlossen. Insbesondere wurde abgeprüft, ob die Angaben zum Ist-Wert und EnEV-Anforderungswert beim Primärenergiebedarf zu den angegebenen Förderstandards passten. Beispielsweise darf beim Effizienzhaus 55 der Ist-Wert maximal 55 % des Anforderungswertes betragen. Fälle, in denen dies (auch nach Ausgleich möglicher Rundungsfeh-

Die unterschiedlichen Haupt-Energieträger der Untersuchungsfälle sind auch hier farbig markiert: Elektrischer Strom: 61 Fälle (blau), Erdgas: 37 Fälle (rot), Flüssiggas: 1 Fall (ebenfalls rot), Heizöl: 1 Fall (schwarz), Holz/Holzpellets: 31 Fälle (grün), Fernwärme: 10 Fälle (braun).

Die Aufteilung nach Förderstandards ist wie folgt: 36 Effizienzhäuser 40 (darin sieben Passivhäuser), 52 Effizienzhäuser 55 (darin drei Passivhäuser), 44 Effizienzhäuser 70, 9 Effizienzhäuser 85. Eine genauere Analyse der Effizienzhausstandards erfolgt später in Kapitel 5.4.

Die dargestellten Punkte liegen mehrheitlich etwas über der Winkelhalbierenden, d. h. der im Modell ermittelte Endenergiebedarf des Haupt-Energieträgers wird durch die tatsächlichen Verbrauchswerte im Mittel überschritten.

Im Hinblick auf die Regressionsanalyse ist hier, anders als bei der Untersuchung der Bestandsgebäude in Kapitel 4, nicht mit einer relevanten Krümmung der Ausgleichskurve zu rechnen. Es erscheinen zwei Ansätze sinnvoll:

Es wird eine Ausgleichsgerade durch den Ursprung betrachtet und eine Ausgleichsgerade mit y-Achsenabschnitt (die also im Allgemeinen nicht durch den Ursprung verläuft).

Der Ansatz für den an die Verbrauchswerte angepassten Energiebedarf  $q_{B,V}$  lautet im ersten Fall:

$$q_{B,V} = c_1 q_B$$

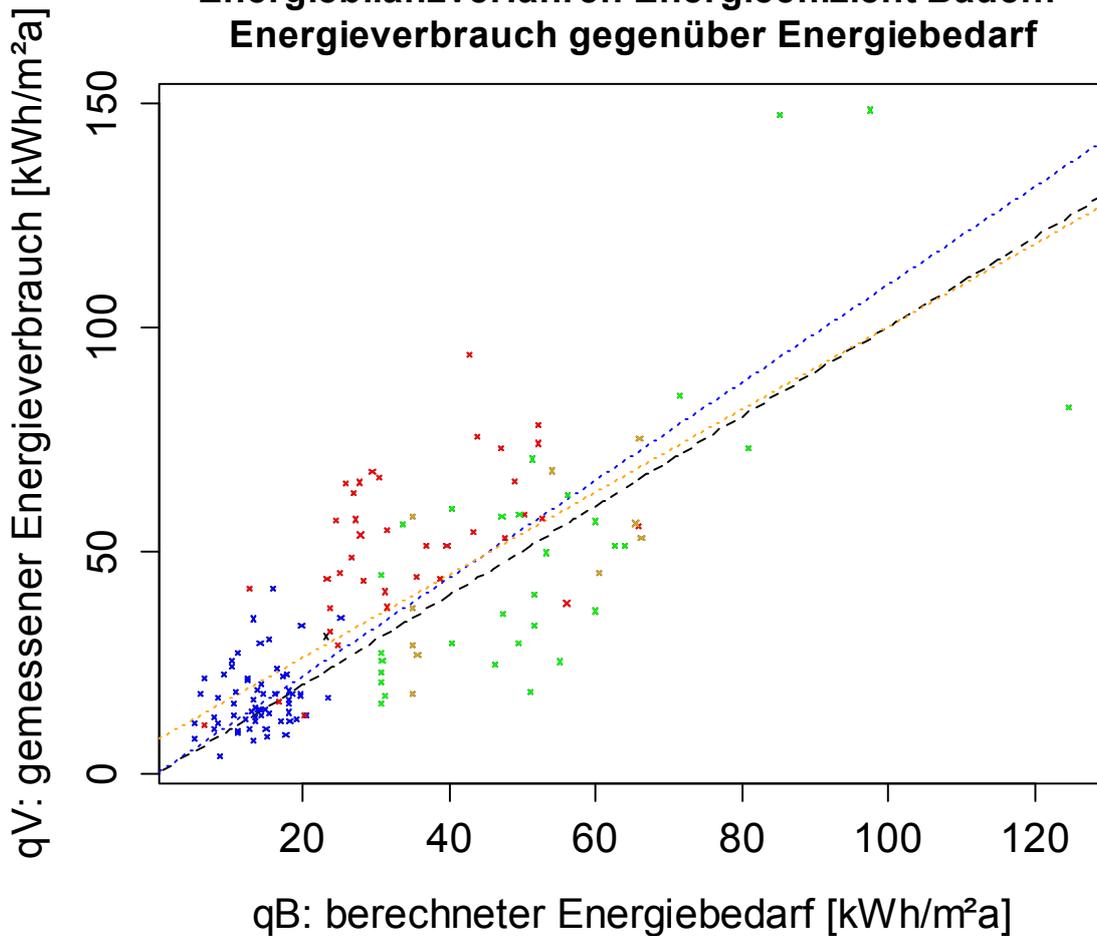
Das Ergebnis für den Regressionskoeffizienten, der als die Steigung der Ausgleichsgerade zu interpretieren ist, lautet:  $c_1 = 1,095 \pm 0,038$

Die Ausgleichsgerade ist als blaue gepunktete Linie im Diagramm eingezeichnet.

---

ler) nicht gegeben war, wurden ausgeschlossen, da hier eventuell eine Fehlangebe des Primärenergiebedarfs, der die Ausgangsbasis des Energiebilanzverfahrens darstellt, vorliegen könnte.

## Energiebilanzverfahren Energieeffizient Bauen: Energieverbrauch gegenüber Energiebedarf



**Abbildung 9** Energiebilanzverfahren „Energieeffizient Bauen“: Berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für den Haupt-Energieträger (Fallzahl: 141 Gebäude)

Werte bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$ ,  
bei Brennstoffen: Angabe des (unteren) Heizwerts  
blau: elektrischer Strom, rot: Erdgas/Flüssiggas, schwarz: Heizöl, grün:  
Holz/Holzpellets, braun: Fernwärme  
gestrichelte Linie: Winkelhalbierende  $q_V = q_B$ ,  
gepunktete Linie (blau): Regressionsgerade durch den Ursprung  
gepunktete Linie (orange): Regressionsgerade mit y-Achsenabschnitt

Im zweiten Fall (dargestellt als orange gepunktete Linie) wird folgendermaßen angesetzt:

$$q_{B,V} = d_0 + d_1 q_B$$

Es ergeben sich:  $d_0 = (7,62 \pm 2,44) \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (y-Achsenabschnitt)

und:  $d_1 = 0,924 \pm 0,066$  (Steigung)

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass für die Energieeinsparungen und Treibhausgasminderungen, die beim Übergang zu einem besseren Neubaustandard erreicht werden, insbesondere die Steigung der Ausgleichskurven ausschlaggebend ist. Hier sind die Ergebnisse nicht einheitlich, d. h. die Steigung könnte nach diesen beiden Ansätzen grob gesprochen

rund 10 % höher oder auch niedriger liegen als im ursprünglichen Modell (Steigungen 1,095 bzw. 0,924 verglichen mit dem unkorrigierten Wert 1,0). In diesem Zusammenhang ist generell auch die begrenzte Fallzahl der Auswertung zu beachten.

Vor diesem Hintergrund erscheint es auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht angebracht, das existierende Bilanzverfahren zu korrigieren: Die Abweichungen sowohl der Absolutwerte des Energieverbrauchs (mehrfache Überschreitung der  $\gamma$ -Werte der Winkelhalbierenden durch die Verbrauchswerte) als auch die denkbaren Korrekturen bei der Steigung einer Ausgleichsgrade (die Einsparungen zwischen unterschiedlichen Neubaustandards bestimmt) erscheinen nicht so gravierend, dass eine Anpassung angesichts der begrenzten Stichprobenzahl hier sinnvoll bzw. notwendig erschiene. Differenziertere Untersuchungen mit einer größeren Stichprobe wären für die Zukunft gleichwohl wünschenswert.

## **5.4 Vergleich von berechneten und gemessenen Primärenergiekennwerten**

Der Vergleich unterschiedlicher Energieeffizienzstandards ist für die Bewertung der im Programm „Energieeffizient Bauen“ geförderten Maßnahmen von wesentlicher Bedeutung. Daher wird diese Fragestellung hier noch einmal gesondert untersucht.

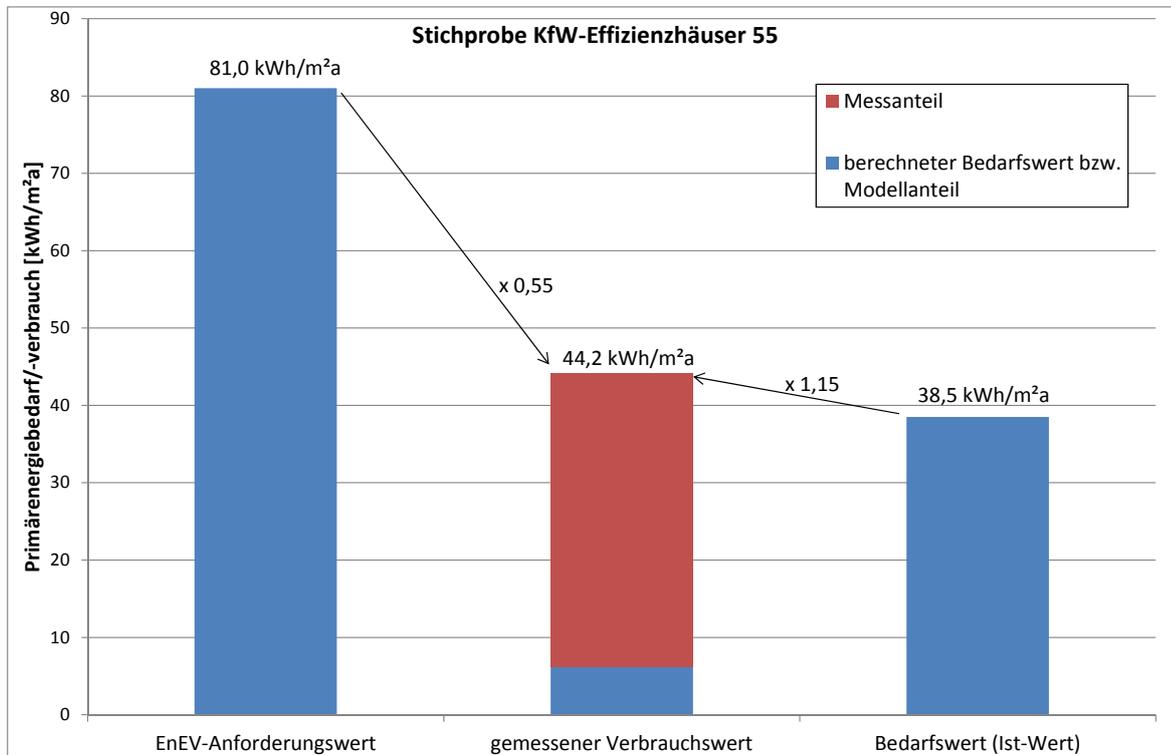
Dabei ist zu beachten, dass die Energieeinsparungen und Treibhausgasminderungen beim jährlichen Monitoring des Programms auf den Referenzfall „Energieeinsparverordnung (EnEV)“ bezogen sind, d. h. auf ein Gebäude, das lediglich die Mindestanforderungen für Neubauten einhält. Für diesen Referenzfall liegen hier in der Stichprobe keine Untersuchungsfälle vor, insbesondere nicht für die frühere Fassung der EnEV, die für die Stichprobenfälle (Förderung in den Jahren 2010/2011) relevant war. Allerdings ist zu beachten, dass die EnEV im Jahr 2016 verschärft wurde. Insbesondere ist jetzt ein Primärkennwert einzuhalten, der maximal noch 75 % des Kennwerts für das (unverändert gebliebenen) EnEV-Referenzgebäude betragen darf. Damit liegen die Anforderungen der neuen EnEV an Neubauten etwa in der Größenordnung der heute nicht mehr geförderten Effizienzhäuser 70 bzw. 85, bei denen 70 % bzw. 85 % des Referenzgebäude-Kennwerts einzuhalten waren. Diese früheren Förderstandards können damit grob betrachtet als „einigermaßen typisch“ für den neuen EnEV-Standard angesehen werden – sicherlich nicht für das genaue Anforderungsniveau, aber doch für die Art der durchgeführten Maßnahmen bei Wärmeschutz und Wärmeversorgung und die zu erwartenden Relationen zwischen berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch.

Einschränkend ist dabei allerdings noch zu berücksichtigen, dass die Wärmeschutz-Anforderungen der neuen EnEV verglichen mit den früheren Standards noch merklich schwächer sind (sie entsprechen grob denen des Effizienzhaus 85). Außerdem wird bei der Förderung durch die geforderte Einbindung eines Sachverständigen auf ein gewisses zusätzliches Maß an Qualitätssicherung geachtet, das bei einem Gebäude nach EnEV nicht garantiert ist.

Bei Untersuchung der gemessenen Energieverbrauchswerte zur Ermittlung tatsächlich erreichter Primärenergiekennwerte ist zu beachten, dass diese zum Großteil, aber nicht ausschließlich durch die gemessenen Verbräuche des Haupt-Energieträgers (multipliziert mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor) bestimmt werden. Auch die Hilfsstromverbräuche, die nicht oder (beim Haupt-Energieträger Strom) gegebenenfalls nur teilweise mit gemessen wurden, sind mit ihrem Primärenergiebeitrag zu berücksichtigen. Aus diesem Grund setzen sich die Ergebnisse zum gemessenen Primärenergieverbrauch immer aus einem tatsächlich gemessenen, auf Verbrauchswerten basierenden Anteil („Messanteil“) und einem kleineren, auf den theoretischen Ansätzen des Bilanzmodells beruhenden Anteil („Modellanteil“) zusammen.

Die Zahl der untersuchten Fälle wurde gegenüber Kapitel 5.3 noch einmal um 11 auf 130 reduziert. Grund hierfür ist insbesondere, dass in der Stichprobe auch noch Fälle auftraten, deren Effizienzhaus-Standard nicht auf Basis der EnEV 2009, sondern der noch älteren EnEV 2007 definiert war. Diese wurden hier im Sinne eindeutig definierter Standards ausgeschlossen.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse für das Effizienzhaus 55 mit 45 auswertbaren Stichprobenfällen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Primärenergiekennwerte dieser Teilstichprobe.



**Abbildung 10** Mittlere Primärenergiekennwerte für die Effizienzhäuser 55 (EH 55) der Stichprobe „Energieeffizient Bauen“ (45 Fälle): Vergleich der gemessenen Primärenergieverbräuche mit den Angaben im Energieausweis (Ist-Wert und Anforderungswert der EnEV)  
 Werte bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$

Der mittlere gemessene Primärenergieverbrauch der dargestellten Effizienzhäuser 55 beträgt insgesamt 44,2 kWh/m²a (bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$ ). Er setzt sich wie oben beschrieben, aus einem Messanteil (rot dargestellt: 38,0 kWh/m²a bzw. rund 86 % des Gesamtwerts) und einem Modellanteil (blau: 6,2 kWh/m²a bzw. 14 %) zusammen. Die Mittelwerte der Energiebedarfskennwerte aus dem Energieausweis sind links (EnEV-Anforderungswert) und rechts (Ist-Wert) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der gemessene Primärenergieverbrauch bei rund 55 % des EnEV-Anforderungswerts liegt. Die KfW-Bedingung für den Primärenergiekennwert beim Effizienzhaus 55 wird von der Stichprobe also auch bei Betrachtung der Messwerte im Mittel eingehalten<sup>26</sup>. Dies gilt hier, obwohl dieser mittlere gemessene Primärenergieverbrauch der Gebäude den durchschnittlichen Bedarfswert aus dem Energieausweis um rund 15 % überschreitet.

Die Ergebnisse für alle Effizienzhausstandards sind in Tabelle 4 dargestellt. Dabei sind für die mittleren Primärenergiekennwerte jeweils auch die statistischen Standardfehler eingetragen. Im Fall des Effizienzhauses 85 ist aufgrund der geringen Zahl von 9 Stichprobenfällen zu beachten, dass die Auswertungsergebnisse für sich genommen kaum aussagekräftig sind. Die Werte sind daher in blauer Schrift verkleinert eingetragen, und auf die Angabe von Standardfehlern wurde verzichtet.

<sup>26</sup> Dabei ist zu beachten, dass hier ein gemessener Referenzwert für den Vergleichsfall der Einhaltung der EnEV-Anforderungen naturgemäß nicht vorliegen kann.

**Tabelle 4 Primärenergiekennwerte  $q_p$  der verschiedenen Effizienzhausstandards („Energieeffizient Bauen“): Mittelwerte der ausgewerteten Teilstichproben**  
Angaben bezogen auf die Gebäudenutzfläche  $A_N$

|   |                      | EH 85 | EH 70        | EH 55        | EH 40        |
|---|----------------------|-------|--------------|--------------|--------------|
| auswertbare Fälle   |                      | 9     | 40           | 45           | 36           |
| $q_p$ EnEV-Anforderungswert (Energieausweis)                | kWh/m <sup>2</sup> a | 79,4  | 75,2 +/- 2,2 | 81,0 +/- 1,8 | 78,1 +/- 2,7 |
| $q_p$ aus gemessenen Verbräuchen ermittelt                  | kWh/m <sup>2</sup> a | 79,7  | 51,2 +/- 3,9 | 44,2 +/- 3,6 | 32,2 +/- 2,8 |
| davon: Messanteil   |                      | 89%   | 90%          | 86%          | 80%          |
| Relation $q_p$ : Verbrauchs-/EnEV-Anforderungswert          |                      | 1,00  | 0,68         | 0,55         | 0,41         |
| Relation $q_p$ : KfW-Anforderung                            |                      | 0,85  | 0,7          | 0,55         | 0,40         |
| $q_p$ Bedarfswert (Energieausweis, Ist-Wert)                | kWh/m <sup>2</sup> a | 64,1  | 44,4 +/- 2,0 | 38,5 +/- 1,3 | 27,3 +/- 1,3 |
| Relation Verbrauchs-/Bedarfswert                            |                      | 1,24  | 1,15         | 1,15         | 1,18         |
| $q_p$ gem. Verbrauchswert mit $f_{p,Strom} = 1,8$ statt 2,6 | kWh/m <sup>2</sup> a | 71,9  | 45,2 +/- 4,0 | 34,5 +/- 2,9 | 24,6 +/- 2,0 |

Die Werte zeigen, dass die auf die Rechenwerte bezogene KfW-Anforderung (Maximalwert der Relation des Primärenergieeinsatzes zum EnEV-Anforderungswert) durch die auf gemessenen Verbräuchen basierenden Werte auch im Fall des Effizienzhaus-70-Standards eingehalten und beim Effizienzhaus 40 nur knapp verfehlt werden (Relation 0,41 statt 0,40). Auch hier werden die Ist-Werte des Primärenergiebedarfs durch die gemessenen Verbräuche leicht überschritten (um 15 % beim Effizienzhaus 70 und um 18 % beim Effizienzhaus 40)<sup>27</sup>.

Diese gleichmäßige Überschreitung der theoretischen Ist-Werte des Energieausweises durch die Messwerte führt dazu, dass auch die Differenzen zwischen den Effizienzhausstandards bei den gemessenen Primärenergieverbräuchen im Mittel etwas höher sind als bei den Bedarfswerten: So liegen die Effizienzhäuser 55 beim Primärenergiebedarf (gemäß Energieausweis) im Durchschnitt um  $(44,4 - 38,5)$  kWh/m<sup>2</sup>a = 5,9 kWh/m<sup>2</sup>a niedriger als die Effizienzhäuser 70. Bei Betrachtung der verbrauchs-basierten Primärenergie-Kennwerte beträgt die Differenz dagegen  $(51,2 - 44,2)$  kWh/m<sup>2</sup>a = 7,0 kWh/m<sup>2</sup>a. Ähnlich fällt der Vergleich zwischen dem Effizienzhaus 70 und dem Effizienzhaus 40 aus. Diese Ergebnisse können als ein Hinweis darauf interpretiert werden, dass die über die Bedarfswerte berechneten Primärenergieeinsparungen der Effizienzhäuser gegenüber Vergleichsgebäuden, die nur den EnEV-Standard einhalten (der heute wie gesagt im Bereich der Effizienzhäuser 70 und 85 liegt), in der Praxis tatsächlich erreicht werden.

Vor dem Hintergrund, dass die Förderanträge der untersuchten Gebäude (mit Förderzusagen im Jahr 2010 bzw. 2011) und daher auch die Erstellung von deren Energieausweisen schon einige Jahre zurückliegen, ist noch eine Besonderheit zu beachten, die hier zum Schluss noch untersucht werden soll: Der gemäß EnEV definierte Primärenergiefaktor für Strom hat sich im Laufe der Jahre geändert: Für die Förderfälle 2010/2011 und die in dieser Zeit ausgestellten Energieausweise galt in der Regel  $f_{p,Strom} = 2,6$ , heute wird dagegen  $f_{p,Strom} = 1,8$  verwendet. Alle bisherigen Auswertungen zum Modellvergleich basieren auf dem originalen Wert von 2,6. Der Übergang zu dem aktuellen Wert von 1,8 ist in der letzten Zeile der Tabelle dargestellt. Er führt zu einer weiteren Absenkung der gemessenen Primärenergiekennwerte: Diese betragen dann im Fall des Effizienzhaus 55 durchschnittlich nur noch 34,5 kWh/m<sup>2</sup>a und liegen jetzt niedriger als die ursprünglichen Bedarfswerte aus dem Energieausweis (38,5 kWh/m<sup>2</sup>a im Durchschnitt). Auch beim Effizienzhaus 40 wird der ursprüngliche rechnerische Ist-Wert dann unterschritten (24,6 gegenüber 27,3 kWh/m<sup>2</sup>a) und beim Effizienzhaus 70 noch nicht ganz, aber annähernd erreicht (45,2 gegenüber 44,4 kWh/m<sup>2</sup>a). Ein weiterer Fortschritt bei der Verbesserung der Primärenergieeffizienz im Stromsektor (z. B.

<sup>27</sup> Beim Effizienzhaus 85 fallen die Ergebnisse etwas ungünstiger aus: Der gemessene Primärenergieverbrauch liegt ungefähr gleichauf mit dem EnEV-Anforderungswert (statt bei 85 %), und der mittlere Ist-Wert im Energieausweis wird um 24 % überschritten. Allerdings ist hier wie gesagt die geringe Fallzahl zu beachten.

durch steigende Anteile erneuerbarer Energien) führt also auch zukünftig zu einer weiteren Absenkung der Primärenergiekennwerte bereits früher errichteter Gebäude.

Die ursprünglichen Einsparungen sollten aber grundsätzlich weiter bei den geförderten Maßnahmen verbucht werden: Diese Einsparungen traten hier (und nicht im Stromsektor) zuerst auf, und die hohe Energieeffizienz und insbesondere die gute Wärmedämmung dieser Gebäude führt beispielsweise bei Verwendung elektrischer Wärmepumpen dazu, dass zu ihrer Versorgung mit elektrischer Energie weniger regenerativ erzeugter Strom erforderlich ist als bei schlechter gedämmten Gebäuden, wenn in beiden Fällen der gleiche Strom-Primärenergiefaktor erreicht werden soll. Während also einerseits erhöhte Anstrengungen im Stromsektor und ein sinkender Primärenergie- bzw. Treibhausgas-Emissionsfaktor dort die Einhaltung der Klimaschutzziele im Gebäudebereich erleichtern, hilft andererseits die Reduzierung des Energie- und damit auch des Stromverbrauchs durch Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich, die Ziele im Stromsektor (größere Anteile erneuerbarer Energien, geringere Primärenergie- und Emissionsfaktoren) zu erreichen.

## **6 Untersuchungen mit dem TABULA-Verfahren (Bestand und Neubau)**

### **6.1 Hintergrund zum TABULA-Energiebilanzverfahren**

Das TABULA-Berechnungsverfahren ist ein auf die energetische Bewertung größerer Gebäudebestände zugeschnittenes Bilanzverfahren. Im Rahmen der EU-Projekte TABULA und EPISCOPE wurde die Methode als "Referenz-Rechenverfahren" entwickelt, das die Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Warmwasser für alle Bestandsgebäude der beteiligten Länder erlaubt (siehe [www.episcope.eu](http://www.episcope.eu)). Grundlage der Berechnung sind die europäischen Normen, insbesondere EN ISO 13790 für die Berechnung der Heizwärmebilanz auf der Basis der saisonalen Methode (Heizperiodenbilanz) und EN 15316 / Level B (tabellierte Werte für die Heizsystem-Komponenten). Das Rechenschema ist bewusst einfach gehalten, damit die Bilanzen von Experten verschiedener Länder leicht nachvollziehbar sind. Zudem lassen sich die Formeln leicht in Tabellen-Kalkulationsblätter eingeben, wodurch die Bilanzierung von größeren Gebäude-Samples oder -Portfolios und die Durchführung von Parameterstudien z. B. im Zusammenhang mit Szenarienanalysen leichter möglich ist.

Das Verfahren liefert als Referenzrechenverfahren zunächst Aussagen über die jährlichen Energieströme und den Bedarf an Energieträgern unter standardisierten Bedingungen. Liegt für ein Einzelgebäude eine detaillierte Vermessung vor oder gibt es für eine Gebäuestichprobe empirisch ermittelte Daten, so kann eine Realbilanzierung mit realistischen Ansätzen durchgeführt werden.

Aufgrund der verbleibenden Unsicherheiten der Eingangsdaten ist sowohl bei der standardisierten Berechnung als auch bei einer Realbilanzierung ein Abgleich mit gemessenen Verbrauchsdaten sinnvoll und notwendig. Methodisch wird dies bei der TABULA-Methode durch Anwendung eines pauschalen Faktors erreicht, mit dem die rechnerische Energiebilanz an das typische Verbrauchsniveau angepasst wird. Das Vorgehen entspricht im Grundsatz der Analyse in den vorangehenden Kapiteln 4 und 5.

Die entsprechenden Kalibrierungsfaktoren wurden im Kontext der EU-Projekte TABULA und EPISCOPE je Land separat festgelegt. Hierbei waren gegebenenfalls vorhandene systematische Abhängigkeiten von der energetischen Gebäudequalität und vom Energieträger berücksichtigt. Liegen keine statistischen Analysen für den Zusammenhang zwischen Bedarf und Verbrauch vor, so wurden als Kalibrierungsfaktoren Expertenschätzungen verwendet und eine entsprechende Kennzeichnung vorgenommen. In Deutschland liegt den bisher verwendeten Kalibrierungsfaktoren eine Untersuchung von Daten aus der Energieberatung zu Grunde [Knissel et al. 2006].

Die Methodik, die Formeln und die Randbedingungen des TABULA-Verfahrens sind dokumentiert in [TABULA Method 2013]. Eine Dokumentation der nationalen Tabellenwerte (U-Werte, Anlagentechnik-Werte) findet sich in [TABULA ScientificR DE 2012]. Die Ableitung des verwendeten Flächenschätzverfahrens ist in [Energieprofil 2005] dokumentiert. Ein Vergleich mit anderen Ländern und eine Validierung des Hüllflächenschätzverfahrens findet sich im Bericht zur TABULA Datenbankanalyse [TABULA Database Evaluation 2015].

### **6.2 Standardansätze und Abkürzungen für die Darstellung der Ergebnisse**

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Verbrauchsanalysen mit Bezug auf das TABULA-Verfahren dargestellt. Es wird zunächst ein Überblick über die Daten zum Verbrauch sowie zur energetischen Qualität der Gebäude, differenziert nach verschiedenen Kriterien gegeben. Die bisherigen Kalibrierungsfaktoren (s. Kap. 6.1) wurden hier und bei den weiteren Auswertungen nicht angewendet.

Darauf aufbauend werden Analysen zur Ermittlung neuer Kalibrierungsfaktoren auf Basis der neuen Verbrauchserhebung im vorliegenden Projekt dargestellt.

Die dargestellten Kennwerte entsprechen im Regelfall dem folgenden Muster, es sein denn es wird explizit auf eine Abweichung hingewiesen:

- Energiemengen werden bei Brennstoffen auf den oberen Heizwert  $H_s$  (Brennwert) bezogen.
- Als Energiebezugsfläche dient die TABULA-Referenzfläche (beheizte Nettogrundfläche), die mit einem Faktor 1,1 pauschal aus der erhobenen direkt erhobenen beheizten Wohnfläche ermittelt wurde.
- Die Endenergiemengen sind in der Regel Angaben für Heizung und Warmwasser. Werden auch Werte nur für Heizung betrachtet, so werden die differenzierten Angaben jeweils mit „H+W“ für Heizung und Warmwasser oder mit „H“ für Heizung gekennzeichnet.

### **6.3 Überblick über die Daten zum Verbrauch und zum Bedarf**

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Stichprobe und die enthaltenen Daten, differenziert nach verschiedenen Kriterien. Die Kenngrößen und Befunde werden nach der Tabelle erläutert.

Tabelle 5

**Vergleich der Energiekennwerte (gemessener Verbrauch und berechneter Bedarf) sowie weitere Ergebnisse der Bilanzierung**  
bei Brennstoffen bezogen auf den oberen Heizwert (Brennwert)  
Flächenbezug: Nettogrundfläche (TABULA-Bezugsfläche)

| Auswahl                       | Anzahl Datensätze | Mittelwerte                      |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  | Standardabweichung     |                        |                                  | Unsicherheit des Mittelwerts V/B-Verhältnis |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|---|
|                               |                   | Energiebezugsfläche (EBF) TABULA | Verhältnis Hüllfläche zu EBF   | WTK Transmission bezogen auf EBF | WTK Transmission bezogen auf Hüllfläche | EKW Nutzwärme Heizung  | EKW Wärmeerzeugung Heizung | EKW Wärmeerzeugung Warmwasser | EKW Berechnung         | EKW Messung            | Verhältnis Messung zu Berechnung | Berechnung             | Messung                | Verhältnis Messung zu Berechnung |   |
|                               |                   | m <sup>2</sup>                   | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> | W/(m <sup>2</sup> K)             | W/(m <sup>2</sup> K)                    | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a)     | kWh/(m <sup>2</sup> a)        | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  |   |
| <b>nach Versorgungssystem</b> |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| <b>alle Gebäude</b>           |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| alle Energieträger            | 1417              | 309                              | 2,49                           | 1,16                             | 0,48                                    | 84                     | 82                         | 27                            | 104                    | 87                     | 0,84                             | 72                     | 61                     | 0,53                             | 0,01  |
| Kessel: Erdgas + Flüssiggas   | 594               | 309                              | 2,42                           | 1,35                             | 0,57                                    | 94                     | 95                         | 28                            | 127                    | 106                    | 0,83                             | 64                     | 55                     | 0,44                             | 0,02  |
| Kessel: Heizöl                | 254               | 299                              | 2,44                           | 1,59                             | 0,66                                    | 109                    | 114                        | 30                            | 156                    | 125                    | 0,80                             | 67                     | 55                     | 0,35                             | 0,02  |
| Kessel: Holz                  | 118               | 315                              | 2,63                           | 0,89                             | 0,35                                    | 70                     | 70                         | 28                            | 107                    | 91                     | 0,85                             | 50                     | 46                     | 0,43                             | 0,04  |
| Öfen                          | 69                | 201                              | 2,65                           | 0,91                             | 0,34                                    | 71                     | 64                         | 26                            | 86                     | 79                     | 0,92                             | 74                     | 69                     | 0,65                             | 0,08  |
| Elektro-Wärmepumpen           | 272               | 231                              | 2,67                           | 0,65                             | 0,24                                    | 51                     | 43                         | 24                            | 22                     | 23                     | 1,05                             | 7                      | 18                     | 0,81                             | 0,05  |
| direkt elektrisch             | 25                | 215                              | 2,40                           | 1,06                             | 0,47                                    | 76                     | 67                         | 24                            | 61                     | 52                     | 0,85                             | 67                     | 51                     | 0,42                             | 0,08  |
| Fernwärme                     | 81                | 714                              | 2,18                           | 0,87                             | 0,42                                    | 68                     | 66                         | 26                            | 81                     | 65                     | 0,80                             | 41                     | 39                     | 0,35                             | 0,04  |
| Wärmeabgabe Erzeuger          | 4                 | 210                              | 2,51                           | 0,58                             | 0,23                                    | 45                     | 34                         | 23                            | 42                     | 35                     | 0,83                             | 2                      | 21                     | 0,48                             | 0,24  |
| <b>nur Heizung</b>            |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| alle Energieträger            | 180               | 364                              | 2,35                           | 1,31                             | 0,58                                    | 93                     | 93                         | 24                            | 105                    | 95                     | 0,90                             | 72                     | 68                     | 0,58                             | 0,04  |
| Kessel: Erdgas + Flüssiggas   | 70                | 419                              | 2,20                           | 1,54                             | 0,71                                    | 106                    | 108                        | 24                            | 118                    | 107                    | 0,91                             | 64                     | 61                     | 0,58                             | 0,07  |
| Kessel: Heizöl                | 28                | 496                              | 2,18                           | 1,79                             | 0,83                                    | 119                    | 128                        | 22                            | 151                    | 138                    | 0,91                             | 60                     | 63                     | 0,45                             | 0,09  |
| Kessel: Holz                  | 2                 | 478                              | 1,73                           | 0,95                             | 0,53                                    | 79                     | 70                         | 26                            | 76                     | 49                     | 0,64                             | 25                     | 9                      | 0,34                             | 0,24  |
| Öfen                          | 58                | 203                              | 2,66                           | 0,94                             | 0,35                                    | 72                     | 66                         | 26                            | 89                     | 79                     | 0,89                             | 79                     | 74                     | 0,65                             | 0,09  |
| Elektro-Wärmepumpen           | 9                 | 306                              | 2,38                           | 0,57                             | 0,24                                    | 52                     | 38                         | 23                            | 13                     | 19                     | 1,46                             | 6                      | 7                      | 0,49                             | 0,16  |
| direkt elektrisch             | 3                 | 215                              | 2,82                           | 1,45                             | 0,59                                    | 108                    | 103                        | 21                            | 60                     | 63                     | 1,05                             | 26                     | 21                     | 0,29                             | 0,17  |
| Fernwärme                     | 9                 | 676                              | 2,08                           | 1,25                             | 0,65                                    | 90                     | 97                         | 23                            | 91                     | 82                     | 0,90                             | 50                     | 44                     | 0,45                             | 0,15  |
| Wärmeabgabe Erzeuger          | 1                 | 172                              | 2,56                           | 0,66                             | 0,26                                    | 49                     | 43                         | 25                            | 43                     | 67                     | 1,56                             | -                      | -                      | -                                | -   |
| <b>Heizung + Warmwasser</b>   |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| alle Energieträger            | 1237              | 301                              | 2,50                           | 1,14                             | 0,47                                    | 82                     | 81                         | 28                            | 104                    | 86                     | 0,83                             | 73                     | 59                     | 0,52                             | 0,01  |
| Kessel: Erdgas + Flüssiggas   | 524               | 295                              | 2,45                           | 1,32                             | 0,55                                    | 93                     | 93                         | 28                            | 128                    | 106                    | 0,83                             | 64                     | 54                     | 0,42                             | 0,02  |
| Kessel: Heizöl                | 226               | 275                              | 2,47                           | 1,56                             | 0,64                                    | 108                    | 112                        | 31                            | 157                    | 123                    | 0,78                             | 68                     | 54                     | 0,34                             | 0,02  |
| Kessel: Holz                  | 116               | 313                              | 2,65                           | 0,89                             | 0,34                                    | 70                     | 70                         | 28                            | 107                    | 91                     | 0,85                             | 50                     | 46                     | 0,43                             | 0,04  |
| Öfen                          | 11                | 191                              | 2,65                           | 0,78                             | 0,29                                    | 61                     | 52                         | 27                            | 73                     | 79                     | 1,08                             | 39                     | 32                     | 0,64                             | 0,19  |
| Elektro-Wärmepumpen           | 263               | 229                              | 2,68                           | 0,65                             | 0,24                                    | 51                     | 43                         | 24                            | 22                     | 23                     | 1,05                             | 7                      | 19                     | 0,82                             | 0,05  |
| direkt elektrisch             | 22                | 215                              | 2,35                           | 1,01                             | 0,45                                    | 71                     | 62                         | 24                            | 61                     | 51                     | 0,84                             | 71                     | 54                     | 0,44                             | 0,09  |
| Fernwärme                     | 72                | 718                              | 2,19                           | 0,82                             | 0,40                                    | 65                     | 62                         | 26                            | 80                     | 63                     | 0,79                             | 40                     | 38                     | 0,34                             | 0,04  |
| Wärmeabgabe Erzeuger          | 3                 | 223                              | 2,50                           | 0,55                             | 0,22                                    | 44                     | 31                         | 22                            | 41                     | 25                     | 0,61                             | 2                      | 3                      | 0,06                             | 0,03  |
| <b>Gruppe A / H+W</b>         |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| alle Energieträger            | 339               | 319                              | 2,42                           | 1,73                             | 0,72                                    | 118                    | 122                        | 29                            | 171                    | 137                    | 0,80                             | 68                     | 56                     | 0,40                             | 0,02  |
| Kessel: Erdgas + Flüssiggas   | 202               | 292                              | 2,42                           | 1,66                             | 0,70                                    | 114                    | 116                        | 29                            | 164                    | 135                    | 0,82                             | 63                     | 59                     | 0,42                             | 0,03  |
| Kessel: Heizöl                | 108               | 297                              | 2,46                           | 1,86                             | 0,76                                    | 126                    | 132                        | 30                            | 190                    | 145                    | 0,76                             | 76                     | 54                     | 0,37                             | 0,04  |
| Kessel: Holz                  | 10                | 286                              | 2,41                           | 1,85                             | 0,77                                    | 137                    | 148                        | 30                            | 194                    | 147                    | 0,76                             | 53                     | 46                     | 0,40                             | 0,13  |
| Öfen                          | 0                 | -                                | -                              | -                                | -                                       | -                      | -                          | -                             | -                      | -                      | -                                | -                      | -                      | -                                | -   |
| Elektro-Wärmepumpen           | 2                 | 407                              | 2,33                           | 0,61                             | 0,27                                    | 55                     | 55                         | 23                            | 25                     | 29                     | 1,16                             | 4                      | 14                     | 0,39                             | 0,28  |
| direkt elektrisch             | 6                 | 236                              | 2,28                           | 2,28                             | 1,06                                    | 156                    | 152                        | 22                            | 166                    | 122                    | 0,73                             | 31                     | 26                     | 0,20                             | 0,08  |
| Fernwärme                     | 11                | 1090                             | 1,93                           | 1,40                             | 0,76                                    | 107                    | 113                        | 27                            | 128                    | 111                    | 0,87                             | 35                     | 36                     | 0,40                             | 0,12  |
| <b>Gruppe B / H+W</b>         |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| alle Energieträger            | 492               | 278                              | 2,50                           | 1,19                             | 0,49                                    | 85                     | 86                         | 29                            | 111                    | 90                     | 0,81                             | 53                     | 46                     | 0,39                             | 0,02  |
| Kessel: Erdgas + Flüssiggas   | 247               | 292                              | 2,40                           | 1,26                             | 0,54                                    | 88                     | 90                         | 28                            | 120                    | 95                     | 0,79                             | 52                     | 43                     | 0,37                             | 0,02  |
| Kessel: Heizöl                | 115               | 253                              | 2,49                           | 1,29                             | 0,53                                    | 92                     | 95                         | 32                            | 127                    | 103                    | 0,81                             | 42                     | 45                     | 0,30                             | 0,03  |
| Kessel: Holz                  | 57                | 235                              | 2,83                           | 0,99                             | 0,36                                    | 74                     | 79                         | 28                            | 115                    | 98                     | 0,85                             | 43                     | 38                     | 0,33                             | 0,04  |
| Öfen                          | 5                 | 198                              | 2,65                           | 1,03                             | 0,38                                    | 75                     | 69                         | 26                            | 97                     | 87                     | 0,90                             | 43                     | 38                     | 0,45                             | 0,20  |

| Auswahl  | Anzahl Datensätze | Mittelwerte                      |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  | Standardabweichung     |                        |                                  | Unsicherheit des Mittelwerts V/B-Verhältnis |
|--|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|---|
|  |                   | Energiebezugsfläche (EBF) TABULA | Verhältnis Hüllfläche zu EBF   | WTK Transmission bezogen auf EBF | WTK Transmission bezogen auf Hüllfläche | EKW Nutzwärme Heizung  | EKW Wärmeerzeugung Heizung | EKW Wärmeerzeugung Warmwasser | EKW Berechnung         | EKW Messung            | Verhältnis Messung zu Berechnung | Berechnung             | Messung                | Verhältnis Messung zu Berechnung |   |
|  |                   | m <sup>2</sup>                   | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> | W/(m <sup>2</sup> K)             | W/(m <sup>2</sup> K)                    | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a)     | kWh/(m <sup>2</sup> a)        | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  |   |
| Elektro-Wärmepumpen                            | 44                | 219                              | 2,76                           | 0,85                             | 0,30                                    | 61                     | 61                         | 24                            | 27                     | 27                     | 1,00                             | 8                      | 15                     | 0,64                             | 0,10  |
| direkt elektrisch                              | 5                 | 218                              | 2,51                           | 0,73                             | 0,29                                    | 53                     | 47                         | 23                            | 42                     | 47                     | 1,12                             | 42                     | 53                     | 0,50                             | 0,22  |
| Fernwärme                                      | 19                | 559                              | 2,23                           | 1,10                             | 0,51                                    | 85                     | 85                         | 28                            | 102                    | 75                     | 0,74                             | 41                     | 32                     | 0,23                             | 0,05  |
| <b>Gruppe C / H+W</b>                          |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| alle Energieträger                             | 406               | 313                              | 2,58                           | 0,59                             | 0,23                                    | 49                     | 40                         | 25                            | 40                     | 39                     | 0,98                             | 28                     | 34                     | 0,71                             | 0,04  |
| Kessel: Erdgas + Flüssiggas                    | 75                | 310                              | 2,64                           | 0,61                             | 0,24                                    | 51                     | 40                         | 27                            | 59                     | 64                     | 1,08                             | 21                     | 33                     | 0,49                             | 0,06  |
| Kessel: Heizöl                                 | 3                 | 297                              | 2,31                           | 0,91                             | 0,39                                    | 70                     | 69                         | 30                            | 104                    | 109                    | 1,05                             | 41                     | 48                     | 0,09                             | 0,05  |
| Kessel: Holz                                   | 49                | 409                              | 2,49                           | 0,57                             | 0,23                                    | 51                     | 44                         | 28                            | 80                     | 72                     | 0,90                             | 29                     | 43                     | 0,54                             | 0,08  |
| Öfen   | 6                 | 185                              | 2,65                           | 0,56                             | 0,21                                    | 50                     | 38                         | 27                            | 54                     | 72                     | 1,33                             | 22                     | 28                     | 0,72                             | 0,29  |
| Elektro-Wärmepumpen                            | 220               | 229                              | 2,66                           | 0,61                             | 0,23                                    | 49                     | 39                         | 24                            | 22                     | 22                     | 1,00                             | 7                      | 19                     | 0,85                             | 0,06  |
| direkt elektrisch                              | 11                | 203                              | 2,31                           | 0,44                             | 0,20                                    | 34                     | 19                         | 26                            | 13                     | 13                     | 1,00                             | 2                      | 6                      | 0,47                             | 0,14  |
| Fernwärme                                      | 42                | 693                              | 2,23                           | 0,54                             | 0,25                                    | 45                     | 39                         | 24                            | 58                     | 44                     | 0,76                             | 18                     | 26                     | 0,36                             | 0,06  |
| <b>nach Förderstandard / Versorgungssystem</b> |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| <b>Gas+Öl / H+W</b>                            |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Passivhaus                                     | 10                | 369                              | 2,48                           | 0,44                             | 0,19                                    | 42                     | 21                         | 25                            | 41                     | 30                     | 0,73                             | 21                     | 12                     | 0,27                             | 0,09  |
| Effizienzhaus 40                               | 8                 | 286                              | 2,69                           | 0,59                             | 0,23                                    | 51                     | 38                         | 27                            | 58                     | 58                     | 1,00                             | 26                     | 25                     | 0,46                             | 0,16  |
| Effizienzhaus 55                               | 20                | 312                              | 2,70                           | 0,68                             | 0,26                                    | 52                     | 43                         | 28                            | 61                     | 54                     | 0,89                             | 18                     | 18                     | 0,26                             | 0,06  |
| Effizienzhaus 70                               | 45                | 306                              | 2,56                           | 0,69                             | 0,27                                    | 56                     | 49                         | 27                            | 69                     | 73                     | 1,06                             | 20                     | 33                     | 0,52                             | 0,08  |
| Effizienzhaus 85                               | 17                | 179                              | 2,66                           | 0,77                             | 0,29                                    | 60                     | 55                         | 26                            | 70                     | 74                     | 1,06                             | 30                     | 31                     | 0,56                             | 0,14  |
| Effizienzhaus 100                              | 22                | 374                              | 2,58                           | 0,81                             | 0,32                                    | 63                     | 65                         | 29                            | 81                     | 77                     | 0,95                             | 25                     | 31                     | 0,46                             | 0,10  |
| Effizienzhaus 115                              | 28                | 237                              | 2,68                           | 1,07                             | 0,40                                    | 77                     | 80                         | 27                            | 96                     | 69                     | 0,72                             | 30                     | 28                     | 0,29                             | 0,05  |
| Effizienzhaus 130                              | 9                 | 207                              | 2,52                           | 0,99                             | 0,39                                    | 79                     | 77                         | 27                            | 96                     | 76                     | 0,79                             | 21                     | 15                     | 0,21                             | 0,07  |
| Einzelmaßnahmen (auch Kombinationen)           | 227               | 269                              | 2,39                           | 1,38                             | 0,59                                    | 96                     | 98                         | 30                            | 131                    | 104                    | 0,79                             | 46                     | 44                     | 0,35                             | 0,02  |
| alle anderen                                   | 364               | 301                              | 2,42                           | 1,67                             | 0,70                                    | 115                    | 118                        | 30                            | 168                    | 134                    | 0,80                             | 69                     | 57                     | 0,40                             | 0,02  |
| <b>Elektro-Wärmepumpen / H+W</b>               |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Passivhaus                                     | 26                | 213                              | 2,41                           | 0,49                             | 0,20                                    | 38                     | 27                         | 24                            | 20                     | 17                     | 0,85                             | 8                      | 12                     | 0,68                             | 0,13  |
| Effizienzhaus 40                               | 49                | 217                              | 2,71                           | 0,55                             | 0,20                                    | 45                     | 34                         | 24                            | 20                     | 18                     | 0,90                             | 7                      | 10                     | 0,52                             | 0,07  |
| Effizienzhaus 55                               | 96                | 224                              | 2,70                           | 0,65                             | 0,24                                    | 53                     | 44                         | 24                            | 23                     | 21                     | 0,91                             | 7                      | 12                     | 0,48                             | 0,05  |
| Effizienzhaus 70                               | 61                | 241                              | 2,69                           | 0,68                             | 0,26                                    | 53                     | 47                         | 25                            | 23                     | 26                     | 1,13                             | 6                      | 17                     | 0,78                             | 0,10  |
| Effizienzhaus 85                               | 6                 | 234                              | 2,93                           | 0,99                             | 0,34                                    | 71                     | 67                         | 24                            | 27                     | 24                     | 0,89                             | 5                      | 8                      | 0,28                             | 0,11  |
| Effizienzhaus 100                              | 6                 | 180                              | 2,83                           | 0,88                             | 0,31                                    | 60                     | 61                         | 26                            | 26                     | 33                     | 1,27                             | 6                      | 22                     | 0,95                             | 0,39  |
| Effizienzhaus 115                              | 1                 | 154                              | 2,52                           | 0,65                             | 0,26                                    | 44                     | 38                         | 20                            | 19                     | 22                     | 1,16                             | -                      | -                      | -                                | -   |
| Effizienzhaus 130                              | 1                 | 110                              | 3,44                           | 1,23                             | 0,36                                    | 80                     | 94                         | 25                            | 52                     | 44                     | 0,85                             | -                      | -                      | -                                | -   |
| Einzelmaßnahmen (auch Kombinationen)           | 9                 | 207                              | 2,93                           | 0,97                             | 0,33                                    | 68                     | 72                         | 26                            | 32                     | 34                     | 1,06                             | 8                      | 12                     | 0,26                             | 0,09  |
| alle anderen                                   | 11                | 344                              | 2,38                           | 0,62                             | 0,26                                    | 48                     | 43                         | 24                            | 21                     | 40                     | 1,90                             | 8                      | 63                     | 2,74                             | 0,83  |
| <b>Holz (Scheitholz, Pellets) / H+W</b>        |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Passivhaus                                     | 3                 | 1256                             | 2,13                           | 0,45                             | 0,23                                    | 48                     | 41                         | 27                            | 65                     | 51                     | 0,78                             | 37                     | 20                     | 0,70                             | 0,40  |
| Effizienzhaus 40                               | 20                | 352                              | 2,48                           | 0,50                             | 0,21                                    | 45                     | 38                         | 28                            | 64                     | 53                     | 0,83                             | 25                     | 28                     | 0,55                             | 0,12  |
| Effizienzhaus 55                               | 26                | 317                              | 2,68                           | 0,62                             | 0,24                                    | 51                     | 47                         | 27                            | 82                     | 74                     | 0,90                             | 27                     | 37                     | 0,56                             | 0,11  |
| Effizienzhaus 70                               | 24                | 223                              | 2,84                           | 0,72                             | 0,25                                    | 60                     | 57                         | 28                            | 94                     | 88                     | 0,94                             | 30                     | 48                     | 0,42                             | 0,09  |
| Effizienzhaus 85                               | 6                 | 220                              | 2,79                           | 0,72                             | 0,25                                    | 53                     | 57                         | 29                            | 105                    | 84                     | 0,80                             | 29                     | 35                     | 0,26                             | 0,11  |
| Effizienzhaus 100                              | 11                | 243                              | 2,60                           | 0,83                             | 0,32                                    | 67                     | 73                         | 26                            | 116                    | 111                    | 0,96                             | 32                     | 34                     | 0,34                             | 0,10  |
| Effizienzhaus 115                              | 5                 | 227                              | 3,25                           | 0,94                             | 0,30                                    | 70                     | 78                         | 27                            | 122                    | 100                    | 0,82                             | 29                     | 31                     | 0,25                             | 0,11  |
| Effizienzhaus 130                              | 1                 | 391                              | 2,66                           | 1,19                             | 0,45                                    | 95                     | 85                         | 48                            | 112                    | 99                     | 0,88                             | -                      | -                      | -                                | -   |
| Einzelmaßnahmen (auch Kombinationen)           | 14                | 251                              | 2,57                           | 1,58                             | 0,62                                    | 113                    | 119                        | 30                            | 152                    | 120                    | 0,79                             | 56                     | 36                     | 0,37                             | 0,10  |
| alle anderen                                   | 16                | 298                              | 2,48                           | 1,49                             | 0,62                                    | 112                    | 117                        | 29                            | 156                    | 133                    | 0,85                             | 69                     | 43                     | 0,53                             | 0,13  |

| Auswahl                                      | Anzahl Datensätze | Mittelwerte                      |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  | Standardabweichung     |                        |                                  | Unsicherheit des Mittelwerts V/B-Verhältnis |
|--|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|---|
|  |                   | Energiebezugsfläche (EBF) TABULA | Verhältnis Hüllfläche zu EBF   | WTK Transmission bezogen auf EBF | WTK Transmission bezogen auf Hüllfläche | EKW Nutzwärme Heizung  | EKW Wärmeerzeugung Heizung | EKW Wärmeerzeugung Warmwasser | EKW Berechnung         | EKW Messung            | Verhältnis Messung zu Berechnung | Berechnung             | Messung                | Verhältnis Messung zu Berechnung |   |
|  |                   | m <sup>2</sup>                   | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> | W/(m <sup>2</sup> K)             | W/(m <sup>2</sup> K)                    | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a)     | kWh/(m <sup>2</sup> a)        | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  |   |
| <b>nach Gebäudegröße / Versorgungssystem</b> |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| <b>EZFH / Gas+Öl / H+W</b>                   |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Gruppe A                                     | 224               | 180                              | 2,59                           | 1,72                             | 0,66                                    | 113                    | 116                        | 30                            | <b>167</b>             | <b>138</b>             | 0,83                             | 70                     | 58                     | 0,42                             | 0,03  |
| Gruppe B                                     | 261               | 193                              | 2,60                           | 1,31                             | 0,52                                    | 89                     | 92                         | 29                            | <b>121</b>             | <b>95</b>              | 0,79                             | 51                     | 44                     | 0,35                             | 0,02  |
| Gruppe C                                     | 54                | 195                              | 2,79                           | 0,63                             | 0,23                                    | 49                     | 39                         | 28                            | <b>55</b>              | <b>59</b>              | 1,07                             | 20                     | 31                     | 0,49                             | 0,07  |
| Passivhaus                                   | 8                 | 253                              | 2,67                           | 0,44                             | 0,17                                    | 34                     | 16                         | 25                            | <b>35</b>              | <b>28</b>              | 0,80                             | 10                     | 11                     | 0,28                             | 0,10  |
| Effizienzhaus 40                             | 5                 | 181                              | 3,04                           | 0,62                             | 0,21                                    | 46                     | 34                         | 28                            | <b>46</b>              | <b>46</b>              | 1,00                             | 9                      | 22                     | 0,30                             | 0,13  |
| Effizienzhaus 55                             | 18                | 210                              | 2,80                           | 0,70                             | 0,26                                    | 53                     | 43                         | 28                            | <b>60</b>              | <b>51</b>              | 0,85                             | 18                     | 17                     | 0,25                             | 0,06  |
| Effizienzhaus 70                             | 26                | 200                              | 2,70                           | 0,71                             | 0,27                                    | 54                     | 48                         | 28                            | <b>65</b>              | <b>66</b>              | 1,02                             | 18                     | 28                     | 0,55                             | 0,11  |
| <b>MFH / Gas+Öl / H+W</b>                    |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Gruppe A                                     | 84                | 601                              | 2,01                           | 1,73                             | 0,86                                    | 131                    | 134                        | 30                            | <b>190</b>             | <b>139</b>             | 0,73                             | 62                     | 55                     | 0,36                             | 0,04  |
| Gruppe B                                     | 100               | 505                              | 2,00                           | 1,17                             | 0,59                                    | 91                     | 90                         | 30                            | <b>124</b>             | <b>103</b>             | 0,83                             | 43                     | 42                     | 0,34                             | 0,03  |
| Gruppe C                                     | 24                | 565                              | 2,27                           | 0,60                             | 0,27                                    | 57                     | 47                         | 27                            | <b>74</b>              | <b>79</b>              | 1,07                             | 25                     | 39                     | 0,47                             | 0,10  |
| Passivhaus                                   | 2                 | 835                              | 1,71                           | 0,41                             | 0,25                                    | 75                     | 42                         | 26                            | <b>65</b>              | <b>39</b>              | 0,60                             | 44                     | 12                     | 0,27                             | 0,19  |
| Effizienzhaus 40                             | 3                 | 462                              | 2,11                           | 0,55                             | 0,25                                    | 58                     | 45                         | 26                            | <b>77</b>              | <b>79</b>              | 1,03                             | 37                     | 14                     | 0,69                             | 0,40  |
| Effizienzhaus 55                             | 2                 | 1233                             | 1,80                           | 0,47                             | 0,26                                    | 45                     | 41                         | 26                            | <b>66</b>              | <b>76</b>              | 1,15                             | 21                     | 10                     | 0,22                             | 0,16  |
| Effizienzhaus 70                             | 19                | 451                              | 2,36                           | 0,65                             | 0,28                                    | 58                     | 49                         | 26                            | <b>73</b>              | <b>81</b>              | 1,11                             | 23                     | 39                     | 0,48                             | 0,11  |
| <b>EZFH / Wärmepumpen / H+W</b>              |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Gruppe A                                     | 0                 | -                                | -                              | -                                | -                                       | -                      | -                          | -                             | -                      | -                      | -                                | -                      | -                      | -                                | -   |
| Gruppe B                                     | 40                | 205                              | 2,84                           | 0,85                             | 0,30                                    | 61                     | 62                         | 24                            | <b>28</b>              | <b>28</b>              | 1,00                             | 9                      | 16                     | 0,65                             | 0,10  |
| Gruppe C                                     | 194               | 197                              | 2,72                           | 0,62                             | 0,23                                    | 49                     | 39                         | 24                            | <b>22</b>              | <b>19</b>              | 0,86                             | 7                      | 12                     | 0,50                             | 0,04  |
| Passivhaus                                   | 24                | 194                              | 2,42                           | 0,49                             | 0,20                                    | 37                     | 27                         | 24                            | <b>21</b>              | <b>15</b>              | 0,71                             | 8                      | 9                      | 0,43                             | 0,09  |
| Effizienzhaus 40                             | 47                | 203                              | 2,75                           | 0,55                             | 0,20                                    | 45                     | 33                         | 24                            | <b>20</b>              | <b>17</b>              | 0,85                             | 7                      | 9                      | 0,51                             | 0,07  |
| Effizienzhaus 55                             | 86                | 197                              | 2,77                           | 0,66                             | 0,24                                    | 53                     | 44                         | 24                            | <b>23</b>              | <b>20</b>              | 0,87                             | 7                      | 12                     | 0,46                             | 0,05  |
| Effizienzhaus 70                             | 47                | 193                              | 2,80                           | 0,70                             | 0,25                                    | 53                     | 47                         | 24                            | <b>23</b>              | <b>24</b>              | 1,04                             | 6                      | 15                     | 0,70                             | 0,10  |
| <b>MFH / Wärmepumpen / H+W</b>               |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Gruppe A                                     | 2                 | 407                              | 2,33                           | 0,61                             | 0,27                                    | 55                     | 55                         | 23                            | <b>25</b>              | <b>29</b>              | 1,16                             | 4                      | 14                     | 0,39                             | 0,28  |
| Gruppe B                                     | 4                 | 362                              | 2,04                           | 0,75                             | 0,38                                    | 63                     | 55                         | 25                            | <b>24</b>              | <b>25</b>              | 1,04                             | 8                      | 11                     | 0,62                             | 0,31  |
| Gruppe C                                     | 25                | 481                              | 2,16                           | 0,56                             | 0,26                                    | 50                     | 40                         | 26                            | <b>21</b>              | <b>40</b>              | 1,90                             | 5                      | 43                     | 1,92                             | 0,38  |
| Passivhaus                                   | 2                 | 434                              | 2,31                           | 0,43                             | 0,19                                    | 46                     | 29                         | 26                            | <b>18</b>              | <b>35</b>              | 1,94                             | 2                      | 31                     | 2,03                             | 1,44  |
| Effizienzhaus 40                             | 2                 | 539                              | 1,83                           | 0,49                             | 0,27                                    | 47                     | 43                         | 26                            | <b>26</b>              | <b>36</b>              | 1,38                             | 2                      | 24                     | 0,81                             | 0,57  |
| Effizienzhaus 55                             | 10                | 454                              | 2,14                           | 0,62                             | 0,29                                    | 54                     | 42                         | 26                            | <b>22</b>              | <b>27</b>              | 1,23                             | 7                      | 11                     | 0,53                             | 0,17  |
| Effizienzhaus 70                             | 13                | 422                              | 2,22                           | 0,63                             | 0,29                                    | 55                     | 46                         | 25                            | <b>22</b>              | <b>34</b>              | 1,55                             | 6                      | 20                     | 0,94                             | 0,26  |
| <b>EZFH / Holz / H+W</b>                     |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Gruppe A                                     | 8                 | 233                              | 2,48                           | 1,75                             | 0,70                                    | 125                    | 137                        | 28                            | <b>181</b>             | <b>164</b>             | 0,91                             | 51                     | 28                     | 0,33                             | 0,12  |
| Gruppe B                                     | 53                | 208                              | 2,88                           | 0,97                             | 0,35                                    | 72                     | 77                         | 29                            | <b>114</b>             | <b>100</b>             | 0,88                             | 39                     | 40                     | 0,33                             | 0,05  |
| Gruppe C                                     | 44                | 219                              | 2,65                           | 0,58                             | 0,22                                    | 50                     | 44                         | 28                            | <b>78</b>              | <b>69</b>              | 0,88                             | 30                     | 42                     | 0,56                             | 0,08  |
| Passivhaus                                   | 2                 | 234                              | 2,60                           | 0,49                             | 0,19                                    | 50                     | 49                         | 28                            | <b>74</b>              | <b>48</b>              | 0,65                             | 47                     | 27                     | 0,97                             | 0,69  |
| Effizienzhaus 40                             | 18                | 225                              | 2,61                           | 0,51                             | 0,20                                    | 45                     | 37                         | 28                            | <b>65</b>              | <b>49</b>              | 0,75                             | 22                     | 21                     | 0,31                             | 0,07  |
| Effizienzhaus 55                             | 22                | 209                              | 2,79                           | 0,63                             | 0,23                                    | 51                     | 49                         | 28                            | <b>84</b>              | <b>75</b>              | 0,89                             | 28                     | 38                     | 0,58                             | 0,12  |
| Effizienzhaus 70                             | 18                | 189                              | 3,00                           | 0,77                             | 0,25                                    | 60                     | 60                         | 30                            | <b>97</b>              | <b>93</b>              | 0,96                             | 33                     | 52                     | 0,47                             | 0,11  |
| <b>MFH / Holz / H+W</b>                      |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| Gruppe A                                     | 2                 | 496                              | 2,15                           | 2,24                             | 1,04                                    | 187                    | 189                        | 37                            | <b>243</b>             | <b>79</b>              | 0,33                             | 33                     | 47                     | 0,24                             | 0,17  |
| Gruppe B                                     | 8                 | 396                              | 2,41                           | 1,08                             | 0,43                                    | 90                     | 88                         | 27                            | <b>113</b>             | <b>82</b>              | 0,73                             | 68                     | 26                     | 0,39                             | 0,14  |
| Gruppe C                                     | 11                | 1045                             | 1,93                           | 0,53                             | 0,28                                    | 52                     | 42                         | 26                            | <b>72</b>              | <b>83</b>              | 1,15                             | 28                     | 38                     | 0,60                             | 0,18  |
| Passivhaus                                   | 1                 | 3300                             | 1,18                           | 0,36                             | 0,30                                    | 43                     | 24                         | 26                            | <b>47</b>              | <b>55</b>              | 1,17                             | -                      | -                      | -                                | -   |
| Effizienzhaus 40                             | 2                 | 1495                             | 1,36                           | 0,40                             | 0,29                                    | 44                     | 47                         | 26                            | <b>56</b>              | <b>90</b>              | 1,61                             | 58                     | 69                     | 0,95                             | 0,67  |
| Effizienzhaus 55                             | 4                 | 909                              | 2,08                           | 0,58                             | 0,29                                    | 53                     | 40                         | 25                            | <b>70</b>              | <b>69</b>              | 0,99                             | 20                     | 36                     | 0,55                             | 0,28  |
| Effizienzhaus 70                             | 6                 | 325                              | 2,36                           | 0,59                             | 0,25                                    | 59                     | 48                         | 24                            | <b>82</b>              | <b>74</b>              | 0,90                             | 15                     | 28                     | 0,25                             | 0,10  |

| Auswahl  | Anzahl Datensätze | Mittelwerte                      |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  | Standardabweichung |           |                                  | Unsicherheit des Mittelwerts V/B-Verhältnis |
|--|-------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------|-------------|----------------------------------|--------------------|-----------|----------------------------------|---|
|  |                   | Energiebezugsfläche (EBF) TABULA | Verhältnis Hüllfläche zu EBF | WTK Transmission bezogen auf EBF | WTK Transmission bezogen auf Hüllfläche | EKW Nutzwärme Heizung | EKW Wärmezeugung Heizung | EKW Wärmezeugung Warmwasser | EKW Berechnung | EKW Messung | Verhältnis Messung zu Berechnung | Berechnung         | Messung   | Verhältnis Messung zu Berechnung |   |
|  |                   | m²                               | m²/m²                        | W/(m²K)                          | W/(m²K)                                 | kWh/(m²a)             | kWh/(m²a)                | kWh/(m²a)                   | kWh/(m²a)      | kWh/(m²a)   |                                  | kWh/(m²a)          | kWh/(m²a) |                                  |   |
| <b>nur 1 Wärmeerzeuger Heizung / nach Gebäudegröße / Versorgungssystem</b> |                   |                                  |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  |                    |           |                                  |   |
| <b>EZFH / Gas+Öl / H+W</b>   |                   |                                  |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  |                    |           |                                  |   |
| Gruppe A   | 117               | 174                              | 2,53                         | 1,70                             | 0,67                                    | 111                   | 114                      | 30                          | <b>179</b>     | <b>139</b>  | 0,78                             | 77                 | 58        | 0,42                             | 0,04  |
| Gruppe B   | 138               | 185                              | 2,50                         | 1,34                             | 0,54                                    | 90                    | 92                       | 30                          | <b>133</b>     | <b>103</b>  | 0,77                             | 52                 | 45        | 0,32                             | 0,03  |
| Gruppe C   | 40                | 190                              | 2,79                         | 0,62                             | 0,22                                    | 48                    | 37                       | 27                          | <b>56</b>      | <b>56</b>   | 1,00                             | 17                 | 26        | 0,41                             | 0,06  |
| Passivhaus   | 6                 | 280                              | 2,46                         | 0,42                             | 0,17                                    | 34                    | 15                       | 26                          | <b>35</b>      | <b>27</b>   | 0,77                             | 12                 | 11        | 0,19                             | 0,08  |
| Effizienzhaus 40   | 4                 | 161                              | 2,98                         | 0,62                             | 0,22                                    | 44                    | 31                       | 28                          | <b>46</b>      | <b>48</b>   | 1,04                             | 10                 | 24        | 0,33                             | 0,17  |
| Effizienzhaus 55   | 15                | 195                              | 2,81                         | 0,72                             | 0,27                                    | 54                    | 45                       | 28                          | <b>63</b>      | <b>52</b>   | 0,83                             | 18                 | 15        | 0,22                             | 0,06  |
| Effizienzhaus 70   | 19                | 181                              | 2,71                         | 0,74                             | 0,27                                    | 54                    | 46                       | 28                          | <b>68</b>      | <b>65</b>   | 0,96                             | 20                 | 24        | 0,46                             | 0,11  |
| <b>MFH / Gas+Öl / H+W</b>  |                   |                                  |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  |                    |           |                                  |   |
| Gruppe A   | 74                | 634                              | 1,98                         | 1,76                             | 0,89                                    | 132                   | 135                      | 30                          | <b>196</b>     | <b>141</b>  | 0,72                             | 61                 | 56        | 0,35                             | 0,04  |
| Gruppe B   | 73                | 557                              | 1,94                         | 1,13                             | 0,59                                    | 88                    | 87                       | 30                          | <b>131</b>     | <b>107</b>  | 0,82                             | 45                 | 41        | 0,35                             | 0,04  |
| Gruppe C   | 23                | 576                              | 2,27                         | 0,60                             | 0,27                                    | 58                    | 47                       | 27                          | <b>75</b>      | <b>80</b>   | 1,07                             | 25                 | 39        | 0,47                             | 0,10  |
| Passivhaus   | 2                 | 835                              | 1,71                         | 0,41                             | 0,25                                    | 75                    | 42                       | 26                          | <b>65</b>      | <b>39</b>   | 0,60                             | 44                 | 12        | 0,27                             | 0,19  |
| Effizienzhaus 40   | 2                 | 544                              | 1,94                         | 0,41                             | 0,21                                    | 49                    | 28                       | 26                          | <b>62</b>      | <b>71</b>   | 1,15                             | 38                 | 1         | 0,88                             | 0,62  |
| Effizienzhaus 55   | 2                 | 1233                             | 1,80                         | 0,47                             | 0,26                                    | 45                    | 41                       | 26                          | <b>66</b>      | <b>76</b>   | 1,15                             | 21                 | 10        | 0,22                             | 0,16  |
| Effizienzhaus 70   | 17                | 467                              | 2,40                         | 0,65                             | 0,28                                    | 58                    | 50                       | 26                          | <b>75</b>      | <b>84</b>   | 1,12                             | 23                 | 40        | 0,50                             | 0,12  |
| <b>EZFH / Wärmepumpen / H+W</b>  |                   |                                  |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  |                    |           |                                  |   |
| Gruppe A   | 0                 | -                                | -                            | -                                | -                                       | -                     | -                        | -                           | -              | -           | -                                | -                  | -         | -                                | -   |
| Gruppe B   | 16                | 222                              | 2,80                         | 0,88                             | 0,31                                    | 61                    | 60                       | 23                          | <b>30</b>      | <b>25</b>   | 0,83                             | 10                 | 12        | 0,44                             | 0,11  |
| Gruppe C   | 95                | 194                              | 2,67                         | 0,59                             | 0,22                                    | 46                    | 36                       | 24                          | <b>22</b>      | <b>19</b>   | 0,86                             | 7                  | 11        | 0,44                             | 0,05  |
| Passivhaus   | 20                | 198                              | 2,41                         | 0,50                             | 0,21                                    | 37                    | 27                       | 24                          | <b>20</b>      | <b>15</b>   | 0,75                             | 7                  | 10        | 0,44                             | 0,10  |
| Effizienzhaus 40   | 25                | 212                              | 2,69                         | 0,54                             | 0,20                                    | 43                    | 30                       | 25                          | <b>19</b>      | <b>15</b>   | 0,79                             | 6                  | 8         | 0,34                             | 0,07  |
| Effizienzhaus 55   | 34                | 200                              | 2,66                         | 0,63                             | 0,24                                    | 50                    | 43                       | 24                          | <b>25</b>      | <b>21</b>   | 0,84                             | 7                  | 11        | 0,41                             | 0,07  |
| Effizienzhaus 70   | 21                | 192                              | 2,88                         | 0,74                             | 0,26                                    | 53                    | 48                       | 24                          | <b>24</b>      | <b>23</b>   | 0,96                             | 7                  | 13        | 0,65                             | 0,14  |
| <b>MFH / Wärmepumpen / H+W</b>   |                   |                                  |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  |                    |           |                                  |   |
| Gruppe A   | 1                 | 286                              | 2,76                         | 0,67                             | 0,24                                    | 60                    | 57                       | 22                          | <b>28</b>      | <b>39</b>   | 1,39                             | -                  | -         | -                                | -   |
| Gruppe B   | 3                 | 347                              | 2,24                         | 0,80                             | 0,37                                    | 67                    | 58                       | 24                          | <b>26</b>      | <b>22</b>   | 0,85                             | 9                  | 11        | 0,58                             | 0,33  |
| Gruppe C   | 19                | 490                              | 2,05                         | 0,55                             | 0,27                                    | 50                    | 40                       | 25                          | <b>22</b>      | <b>42</b>   | 1,91                             | 5                  | 49        | 2,17                             | 0,50  |
| Passivhaus   | 1                 | 352                              | 2,20                         | 0,39                             | 0,18                                    | 49                    | 32                       | 24                          | <b>20</b>      | <b>13</b>   | 0,65                             | -                  | -         | -                                | -   |
| Effizienzhaus 40   | 2                 | 539                              | 1,83                         | 0,49                             | 0,27                                    | 47                    | 43                       | 26                          | <b>26</b>      | <b>36</b>   | 1,38                             | 2                  | 24        | 0,81                             | 0,57  |
| Effizienzhaus 55   | 8                 | 498                              | 2,00                         | 0,63                             | 0,32                                    | 55                    | 42                       | 25                          | <b>22</b>      | <b>24</b>   | 1,09                             | 7                  | 10        | 0,48                             | 0,17  |
| Effizienzhaus 70   | 9                 | 382                              | 2,26                         | 0,64                             | 0,29                                    | 56                    | 48                       | 25                          | <b>23</b>      | <b>38</b>   | 1,65                             | 5                  | 24        | 1,12                             | 0,37  |
| <b>EZFH / Holz / H+W</b>   |                   |                                  |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  |                    |           |                                  |   |
| Gruppe A   | 4                 | 245                              | 2,40                         | 1,68                             | 0,70                                    | 123                   | 133                      | 29                          | <b>208</b>     | <b>173</b>  | 0,83                             | 43                 | 26        | 0,12                             | 0,06  |
| Gruppe B   | 21                | 200                              | 3,05                         | 0,89                             | 0,30                                    | 65                    | 73                       | 28                          | <b>118</b>     | <b>104</b>  | 0,88                             | 33                 | 45        | 0,41                             | 0,09  |
| Gruppe C   | 32                | 218                              | 2,68                         | 0,59                             | 0,22                                    | 50                    | 44                       | 28                          | <b>84</b>      | <b>70</b>   | 0,83                             | 31                 | 43        | 0,36                             | 0,06  |
| Passivhaus   | 1                 | 267                              | 2,75                         | 0,60                             | 0,22                                    | 54                    | 71                       | 30                          | <b>107</b>     | <b>29</b>   | 0,27                             | -                  | -         | -                                | -   |
| Effizienzhaus 40   | 14                | 217                              | 2,69                         | 0,51                             | 0,19                                    | 45                    | 36                       | 28                          | <b>68</b>      | <b>51</b>   | 0,75                             | 23                 | 22        | 0,30                             | 0,08  |
| Effizienzhaus 55   | 15                | 209                              | 2,83                         | 0,64                             | 0,23                                    | 50                    | 50                       | 28                          | <b>92</b>      | <b>76</b>   | 0,83                             | 29                 | 34        | 0,29                             | 0,07  |
| Effizienzhaus 70   | 9                 | 206                              | 3,06                         | 0,81                             | 0,26                                    | 66                    | 63                       | 31                          | <b>117</b>     | <b>110</b>  | 0,94                             | 37                 | 69        | 0,64                             | 0,21  |
| <b>MFH / Holz / H+W</b>  |                   |                                  |                              |                                  |   |                       |                          |                             |                |             |                                  |                    |           |                                  |   |
| Gruppe A   | 1                 | 435                              | 2,15                         | 2,12                             | 0,98                                    | 140                   | 146                      | 48                          | <b>220</b>     | <b>113</b>  | 0,51                             | -                  | -         | -                                | -   |
| Gruppe B   | 4                 | 385                              | 2,44                         | 1,22                             | 0,48                                    | 102                   | 98                       | 22                          | <b>128</b>     | <b>69</b>   | 0,54                             | 97                 | 33        | 0,35                             | 0,18  |
| Gruppe C   | 9                 | 945                              | 2,05                         | 0,55                             | 0,28                                    | 54                    | 41                       | 26                          | <b>76</b>      | <b>82</b>   | 1,08                             | 22                 | 34        | 0,34                             | 0,11  |
| Passivhaus   | 1                 | 3300                             | 1,18                         | 0,36                             | 0,30                                    | 43                    | 24                       | 26                          | <b>47</b>      | <b>55</b>   | 1,17                             | -                  | -         | -                                | -   |
| Effizienzhaus 40   | 0                 | -                                | -                            | -                                | -                                       | -                     | -                        | -                           | -              | -           | -                                | -                  | -         | -                                | -   |
| Effizienzhaus 55   | 4                 | 909                              | 2,08                         | 0,58                             | 0,29                                    | 53                    | 40                       | 25                          | <b>70</b>      | <b>69</b>   | 0,99                             | 20                 | 36        | 0,55                             | 0,28  |
| Effizienzhaus 70   | 6                 | 325                              | 2,36                         | 0,59                             | 0,25                                    | 59                    | 48                       | 24                          | <b>82</b>      | <b>74</b>   | 0,90                             | 15                 | 28        | 0,25                             | 0,10  |

| Auswahl  | Anzahl Datensätze | Mittelwerte                      |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  | Standardabweichung     |                        |                                  | Unsicherheit des Mittelwerts V/B-Verhältnis |
|--|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|---|
|  |                   | Energiebezugsfläche (EBF) TABULA | Verhältnis Hüllfläche zu EBF   | WTK Transmission bezogen auf EBF | WTK Transmission bezogen auf Hüllfläche | EKW Nutzwärme Heizung  | EKW Wärmeerzeugung Heizung | EKW Wärmeerzeugung Warmwasser | EKW Berechnung         | EKW Messung            | Verhältnis Messung zu Berechnung | Berechnung             | Messung                | Verhältnis Messung zu Berechnung |   |
|  |                   | m <sup>2</sup>                   | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> | W/(m <sup>2</sup> K)             | W/(m <sup>2</sup> K)                    | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a)     | kWh/(m <sup>2</sup> a)        | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | kWh/(m <sup>2</sup> a) |                                  |   |
| <b>bis 1978 errichtete, nicht gedämmte Gebäude und Fenstereinbau vor 1995 / nur 1 Wärmeerzeuger Heizung / nur Gas+Öl / nach Gebäudegröße</b> |                   |                                  |                                |                                  |   |                        |                            |                               |                        |                        |                                  |                        |                        |                                  |   |
| EZFH   | 14                | 188                              | 2,57                           | 2,93                             | 1,14                                    | 182                    | 195                        | 29                            | <b>283</b>             | <b>154</b>             | 0,54                             | 73                     | 66                     | 0,26                             | 0,07  |
| MFH  | 10                | 451                              | 1,99                           | 2,42                             | 1,20                                    | 174                    | 179                        | 28                            | <b>231</b>             | <b>161</b>             | 0,70                             | 84                     | 56                     | 0,39                             | 0,12  |
| EZFH / H+W   | 10                | 202                              | 2,62                           | 2,90                             | 1,10                                    | 183                    | 194                        | 35                            | <b>298</b>             | <b>139</b>             | 0,47                             | 83                     | 66                     | 0,24                             | 0,08  |
| MFH / H+W  | 6                 | 418                              | 2,15                           | 2,71                             | 1,24                                    | 194                    | 199                        | 30                            | <b>263</b>             | <b>147</b>             | 0,56                             | 80                     | 58                     | 0,21                             | 0,09  |
| EZFH / H   | 4                 | 155                              | 2,46                           | 3,02                             | 1,23                                    | 180                    | 197                        | 16                            | <b>245</b>             | <b>192</b>             | 0,78                             | 18                     | 52                     | 0,21                             | 0,11  |
| MFH / H  | 4                 | 502                              | 1,76                           | 1,98                             | 1,13                                    | 143                    | 150                        | 25                            | <b>184</b>             | <b>181</b>             | 0,98                             | 75                     | 53                     | 0,45                             | 0,23  |

Daten vom 15-02-2018

In der Tabelle wurden Mittelwerte von folgenden Größen ausgegeben:

- „Energiebezugsfläche (EBF) TABULA“: siehe Definition oben, Mittelwert aller jeweils gefilterten Gebäude. Die unten genannten Kennwerte beziehen sich auf diese Fläche, im Folgenden mit „EBF“ abgekürzt. Auf EBF bezogene Energiemengen werden hier als für Energiekennwerte bezeichnet und mit „EKW“ abgekürzt. Aus der TABULA-Referenzfläche kann die angegebene „beheizte Fläche“ durch Division durch 1,1 ermittelt werden.
- „Verhältnis Hüllfläche zu EBF“: Verhältnis aus geschätzter Hüllfläche zur Energiebezugsfläche. Die Größe ist z. B. bei den EZFH ein Indikator für den Anteil der Reihenhäuser.
- „WTK Transmission bezogen auf EBF“: Wärmetransferkoeffizient Transmission geteilt durch EBF;
- „WTK Transmission bezogen auf Hüllfläche“: Wärmetransferkoeffizient Transmission geteilt durch geschätzte Hüllfläche;
- „EKW Nutzwärme Heizung“: Energiekennwert Heizwärme = berechneter Heizwärmebedarf geteilt durch EBF;
- „EKW Wärmeerzeugung Heizung“: berechneter Jahreswert der Wärmeerzeugung für Heizung aller vorhandenen Wärmeerzeuger geteilt durch EBF;
- „EKW Wärmeerzeugung Warmwasser“: berechneter Jahreswert der Wärmeerzeugung für Warmwasser aller vorhandenen Wärmeerzeuger geteilt durch EBF;

Die für die das Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis bestimmenden Größen sind dann:

- „EKW Berechnung“: auf die EBF bezogener Jahreswert des berechneten Endenergiebedarfs, jeweils für Heizung (H) oder für Heizung + Warmwasser (H+W); jeweils Mittelwert und zugehörige Standardabweichung;
- „EKW Messung“: auf die EBF bezogener Jahreswert des gemessenen Endenergieverbrauchs, jeweils für Heizung (H) oder für Heizung + Warmwasser (H+W); jeweils Mittelwert und zugehörige Standardabweichung

- Verhältnis Messung zu Berechnung: Mittelwert der Einzelwerte des Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnisses der jeweils betrachteten Gebäude und zugehörige Standardabweichung
- „Unsicherheit des Mittelwerts V/B-Verhältnis“: In der letzten Spalte findet sich darüber hinaus die Unsicherheit des Mittelwerts des Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis (Standardabweichung geteilt durch Wurzel aus der jeweiligen Fallzahl).

Bezüglich der in Tabelle 5 dargestellten verfügbaren Fälle und der ermittelten Werte für das Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis kann Folgendes festgestellt werden

- Fälle, für die der kombinierte Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser vorliegt, sind acht Mal so häufig vertreten wie Fälle mit einem Energieverbrauch nur für Warmwasser. Dies gilt weitgehend unabhängig vom Energieträger bzw. vom Wärmeerzeuger. Auf Grund der geringen Fallzahl von Verbrauchswerten nur für Heizung, werden diese in den folgenden differenzierten Analysen nicht betrachtet. Der zu diskutierende Zusammenhang zwischen Verbrauch und Bedarf bezieht sich dann immer auf die Endenergie für Heizung und Warmwasser.
- Bezüglich Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis auswertbar sind aus Gruppe A (vor Modernisierung) 339, aus Gruppe B (nach Modernisierung) 492 und aus Gruppe C 406 Fälle. Den größten Anteil hieran hat jeweils Erdgas. Während bei A und B jeweils Heizöl an zweiter Stelle steht, sind dies bei den Neubauten die Elektro-Wärmepumpen. Heizöl ist bei den Neubauten so gut wie gar nicht vertreten. Dagegen sind Elektro-Wärmepumpen bei den unsanierten Bestandsgebäuden praktisch nicht vertreten.
- Das Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis für Gebäude mit Erdgas-, Heizöl- und Holzkessel ist jeweils ähnlich groß (innerhalb der Gruppen A, B und C, sofern ausreichend Fälle vertreten sind). Daher werden in der folgenden Ermittlung einer Kalibrierungsfunktion diese Fälle zusammen betrachtet.
- Auf Grund der geringen Fallzahlen können Gebäude, die nur mit Einzelöfen oder direkt elektrisch beheizt werden, in die Auswertung des Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis nicht einbezogen werden.
- Bei den Förderstandards ist im Fall der gas- und ölbeheizten Gebäude am häufigsten der Effizienzhaus-70-Standard vertreten, bei den Elektro-Wärmepumpen der Effizienzhaus-55-Standard.
- Betrachtet man die Förderstandards, liegen die durchschnittlichen Werte für das Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis in einem Bereich zwischen 0,73 und 1,06 im Fall der Gas-/Öl-Kessel-Systeme und zwischen 0,85 und 1,27 im Fall der Elektro-Wärmepumpen.
- Betrachtet man speziell die geförderten Effizienzhausstandards, so können besonders geringe Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnisse von 0,73 (Kessel) und 0,85 (Elektro-Wärmepumpen) für den Förderstandard „Passivhaus“ festgestellt werden. Ähnlich niedrige Werte findet man im Fall der Kesselheizungen noch beim Effizienzhaus-115-Standard.
- Beschränkt man die Fälle auf Systeme mit nur einem Wärmeerzeuger und differenziert zwischen EZFH und MFH, können ähnliche Tendenzen festgestellt werden. Allerdings werden durch die geringen Fallzahlen die Unsicherheiten des hierfür ermittelten mittleren Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis deutlich größer (liegen hier jetzt meist zwischen 0,1 und 0,2).
- Gesondert herausgegriffen werden am Ende der Tabelle noch einmal Gebäude, die nach den Angaben der Gebäudeeigentümer keine Dämmung aufweisen und deren Fenster (vorwiegender Fenstertyp) nach 1995 nicht modernisiert wurde. Das Verbrauchs-/Bedarfs-Verhältnis der Ein- und Zweifamilienhäuser liegt um 0,5, im Fall von Mehrfamilienhäusern bei ca. 0,7. Allerdings ist die geringe Fallzahl zu beachten<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> Um sicherzugehen, dass es sich um tatsächlich völlig unsanierte Gebäude handelt, wurden hier nur Gebäude berücksichtigt, für die nach Angaben der Gebäudeeigentümer explizit keine Wärmedämmung und keine verbesserten Fenster vorliegen. Fälle, in denen diesbezüglich Unsicherheiten bestehen, wurden nicht berücksichtigt. Daraus erklärt sich die geringe Fallzahl. Gegebenenfalls könnte man bei zukünftigen Auswertungen die Filter hier noch etwas verfeinern und Altbauten mit hineinnehmen, die bei Errichtung schon mit (dünnen) Dämmschichten versehen wurden.

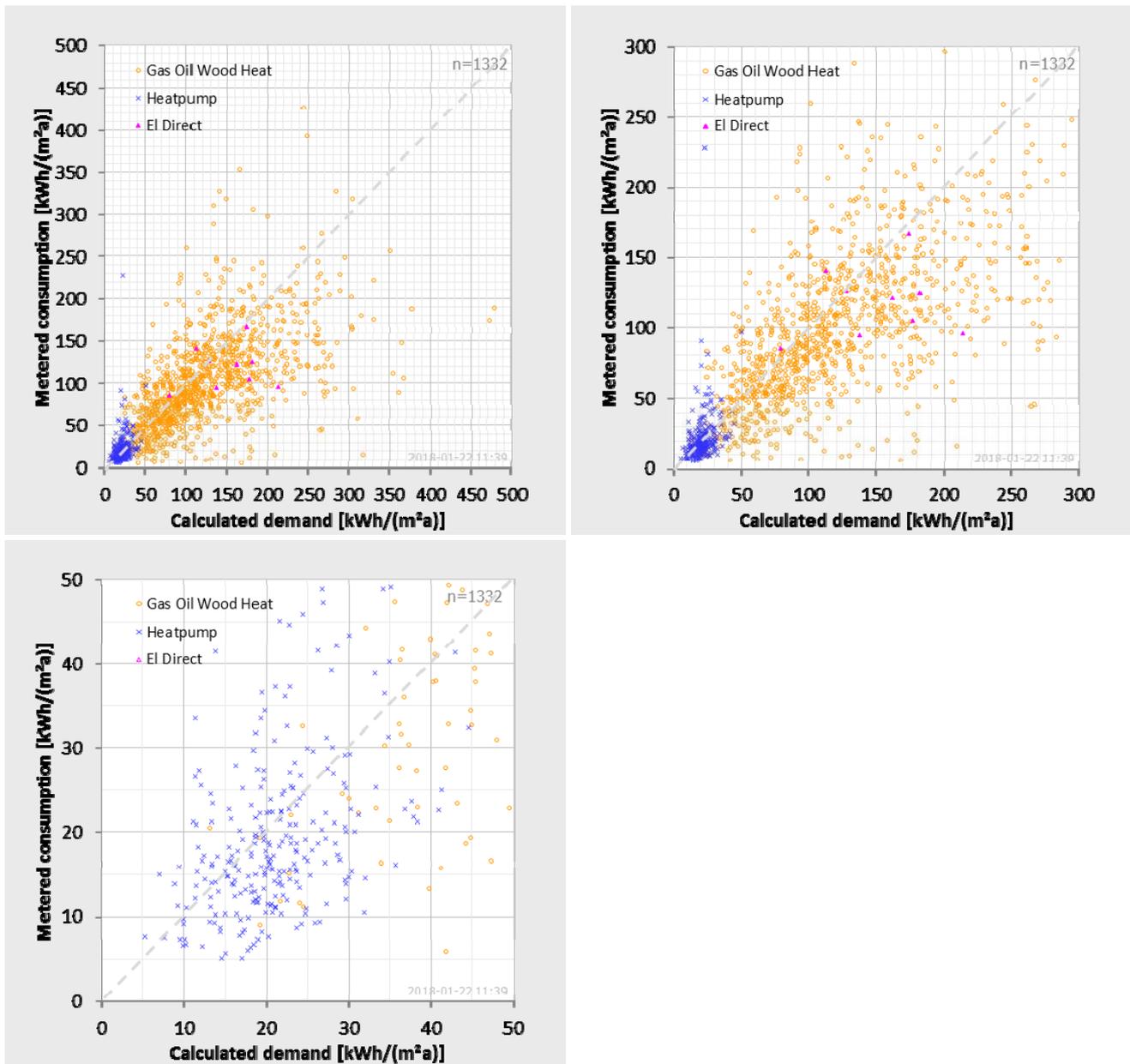
## 6.4 Überblick über den Zusammenhang zwischen Verbrauchs- und Bedarfskennwerten

Die folgenden drei Diagramme zeigen den Zusammenhang zwischen den Verbrauchswerten und den Bedarfswerten der ausgewerteten Gebäude, differenziert nach Heizsystem, jeweils für unterschiedliche Intervalle der beiden Achsen. Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Verbrauch und Bedarf, überlagert durch eine starke Streuung.

Auffällig ist, dass sich die Datenpunkte der Elektrowärmepumpen (blaue Kreuze) fast ausschließlich im Intervall 0 bis 50 kWh/(m<sup>2</sup>a) befinden. Grund ist neben der gegenüber Kesseln deutlich niedrigeren Erzeugeraufwandszahl (Verhältnis Endenergieaufwand zu Wärmeerzeugung) der Wärmepumpen vor allem die Tatsache, dass die Wärmepumpen bei den unsanierten Bestandsgebäuden der Gruppe A praktisch nicht vertreten sind.

---

Die resultierenden mittleren Verbrauchswerte könnten dann mit Benchmarks verglichen werden, die im Kontext der Erstellung von Energieverbrauchsausweisen z. B. durch Abrechnungsunternehmen ermittelt wurden [Schröder et al. 2009] [Fisch et al. 2012].



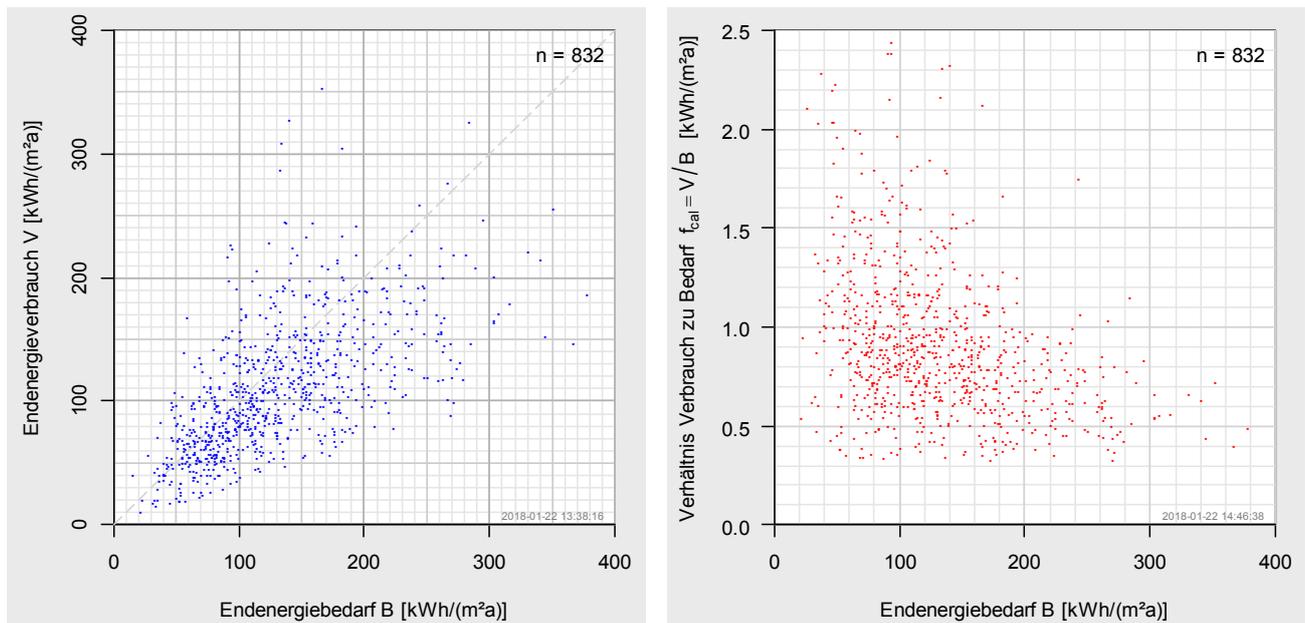
**Abbildung 11** Überblick über die gemessenen Verbrauchskennwerte, aufgetragen über die jeweils berechneten Bedarfskennwerte (TABULA-Verfahren) – für drei verschiedene Skalierungen der Achsen;  
 Bei Brennstoffen: Angabe des oberen Heizwerts  
 Angaben bezogen auf die TABULA-Referenzfläche  
 Systeme „H+W“ und „H“; Elektro-Wärmepumpen und Elektro-Direktheizungen gesondert markiert; auch Gebäude mit ergänzenden Heizsystemen enthalten

## 6.5 Nach Energiebedarf differenzierte Vergleichswerte („Benchmark-Tabelle“)

### 6.5.1 Kessel / Brennstoffe

Im Folgenden wird die Teilmenge der mit Kesseln beheizten Gebäude betrachtet. Darin enthalten sind auch Gebäude mit ergänzenden Heizsystemen. Berücksichtigt wurde aber nur der für Heizung und Warmwasser verwendete Hauptenergieträger – sowohl bei den Verbrauchs- als auch bei den Bedarfskennwerten.

Es wurden Ausreißer entfernt, deren Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis unter 0,3 oder über 3,0 liegt.



(a) Verbrauch über Bedarf

(b) Verhältnis Verbrauch/Bedarf über Bedarf

**Abbildung 12 Zusammenhang von Verbrauch und Bedarf für Gebäude mit Kessel-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereitigt**

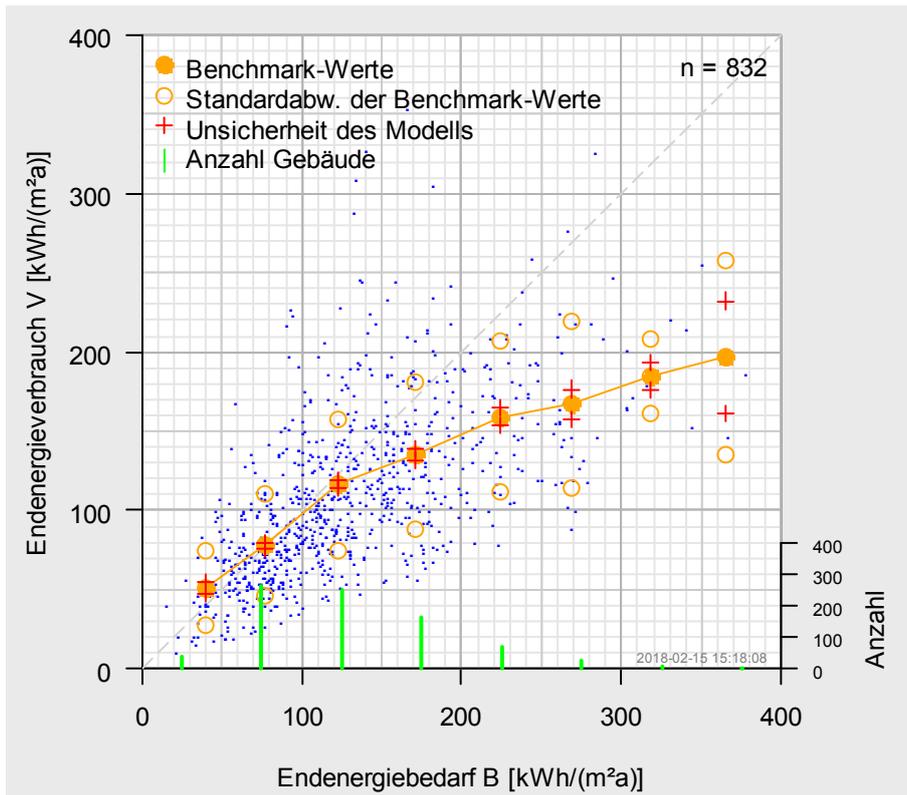
Bei Brennstoffen: Angabe des oberen Heizwerts  
Angaben bezogen auf die TABULA-Referenzfläche

Tabelle 6

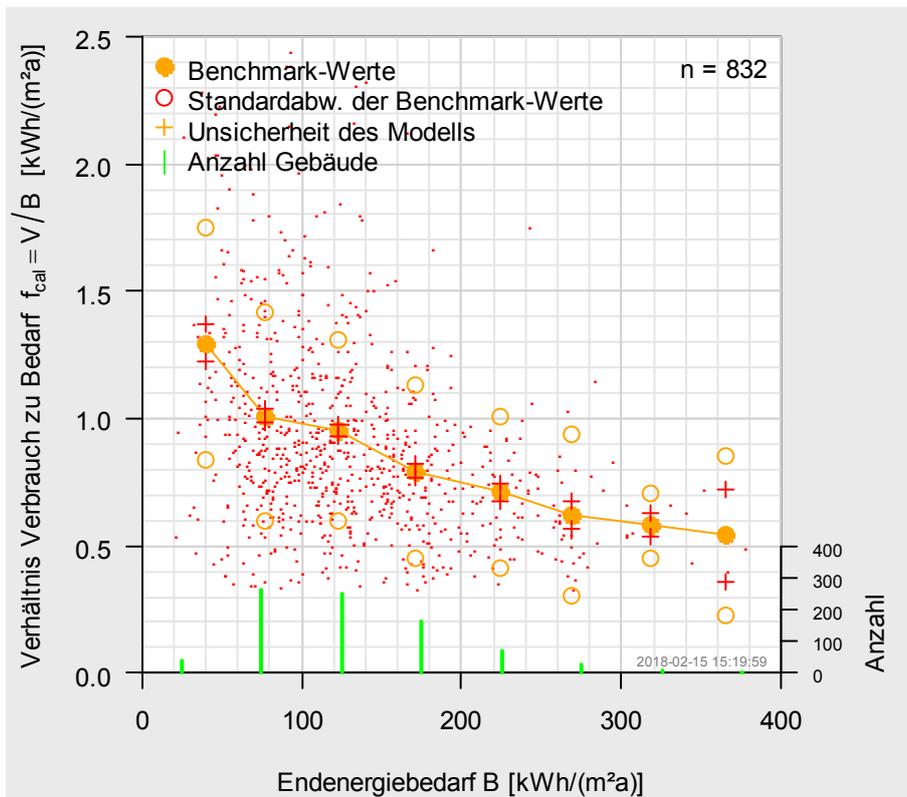
Nach Energiebedarf differenzierte Vergleichswerte für Gebäude mit Kessel-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereitigt

| Bedarfskennwert*  | Intervall   | >    | 0     | 50    | 100   | 150   | 200   | 250   | 300   | 350   | 400 | 450   | 500 | 550 | kWh (m <sup>2</sup> a) |
|---|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-----|-----|------------------------|
|   |   | ≤    | 50    | 100   | 150   | 200   | 250   | 300   | 350   | 400   | 450 | 500   | 550 | 600 |                        |
|   | Mittelwert  |      | 40    | 77    | 123   | 171   | 224   | 269   | 318   | 365   | -   | 476   | -   | -   |                        |
| Verbrauchskennwert**  | Mittelwert  |      | 51    | 78    | 117   | 135   | 159   | 167   | 185   | 197   | -   | 181   | -   | -   | kWh (m <sup>2</sup> a) |
|   | Standardabweichung                                |      | ± 24  | ± 32  | ± 42  | ± 46  | ± 47  | ± 53  | ± 24  | ± 61  | -   | ± 9   | -   | -   | kWh (m <sup>2</sup> a) |
| Quotient aus mittlerem Verbrauchskennwert und mittlerem Bedarfskennwert   |   |      | 1,30  | 1,01  | 0,95  | 0,79  | 0,71  | 0,62  | 0,58  | 0,54  | -   | 0,38  | -   | -   |                        |
| Analyse der Quotienten Verbrauchskennwert zu Bedarfskennwert  | Mittelwert  |      | 1,29  | 1,02  | 0,95  | 0,80  | 0,71  | 0,62  | 0,58  | 0,54  | -   | 0,38  | -   | -   |                        |
|   | Standardabweichung (absolut)                      |      | ±0,59 | ±0,41 | ±0,34 | ±0,27 | ±0,21 | ±0,20 | ±0,07 | ±0,17 | -   | ±0,02 | -   | -   |                        |
|   | relative Standardabweichung***                    |      | ±46%  | ±41%  | ±36%  | ±34%  | ±30%  | ±32%  | ±13%  | ±31%  | -   | ±5%   | -   | -   |                        |
|   | relative Standardunsicherheit des Mittelwerts**** |      | ±7%   | ±3%   | ±2%   | ±3%   | ±4%   | ±6%   | ±5%   | ±18%  | -   | ±3%   | -   | -   |                        |
|   | Perzentile absolut (50 = Median)                  | 95   | 2,24  | 1,74  | 1,59  | 1,22  | 0,97  | 0,96  | 0,67  | 0,71  | -   | 0,39  | -   | -   |                        |
|   |   | 75   | 1,71  | 1,20  | 1,12  | 0,94  | 0,80  | 0,75  | 0,64  | 0,61  | -   | 0,39  | -   | -   |                        |
|   |   | 50   | 1,14  | 0,94  | 0,89  | 0,77  | 0,70  | 0,59  | 0,57  | 0,50  | -   | 0,38  | -   | -   |                        |
|   |   | 25   | 0,92  | 0,75  | 0,73  | 0,61  | 0,55  | 0,47  | 0,55  | 0,45  | -   | 0,37  | -   | -   |                        |
|   | Perzentile relativ (bezogen auf Median)           | 95   | +97%  | +85%  | +78%  | +58%  | +40%  | +62%  | +18%  | +43%  | -   | +3%   | -   | -   |                        |
|   |   | 75   | +51%  | +28%  | +25%  | +21%  | +15%  | +27%  | +14%  | +24%  | -   | +2%   | -   | -   |                        |
| 25  |   | -19% | -21%  | -18%  | -21%  | -20%  | -21%  | -3%   | -9%   | -     | -2% | -     | -   |     |                        |
| 05  |   | -58% | -49%  | -43%  | -47%  | -34%  | -36%  | -15%  | -17%  | -     | -3% | -     | -   |     |                        |
| Anzahl Datensätze   |   |      | 40    | 263   | 252   | 166   | 68    | 30    | 8     | 3     | 0   | 2     | 0   | 0   |                        |
| <p>*) auf den Brennwert bezogener Norm-Energiebedarf, berechnet nach TABULA; Flächenbezug: Nettogrundfläche (TABULA-Bezugsfläche)</p> <p>**) auf den Brennwert bezogener gemessener Jahresverbrauch; Flächenbezug: Nettogrundfläche (TABULA-Bezugsfläche); Standardabweichung mittelbar bestimmt über die relative Standardabweichung des Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnisses</p> <p>***) relative Standardabweichung: bezogen auf den Quotienten der beiden Mittelwerte; Grundlage für die "Standardabweichung Verbrauchskennwert"</p> <p>****) relative Standardunsicherheit des Mittelwerts, auch bezeichnet als relativer Standardfehler</p> |   |      |       |       |       |       |       |       |       |       |     |       |     |     |                        |

Datenstand: 22-01-2018



(a) Verbrauch über Bedarf

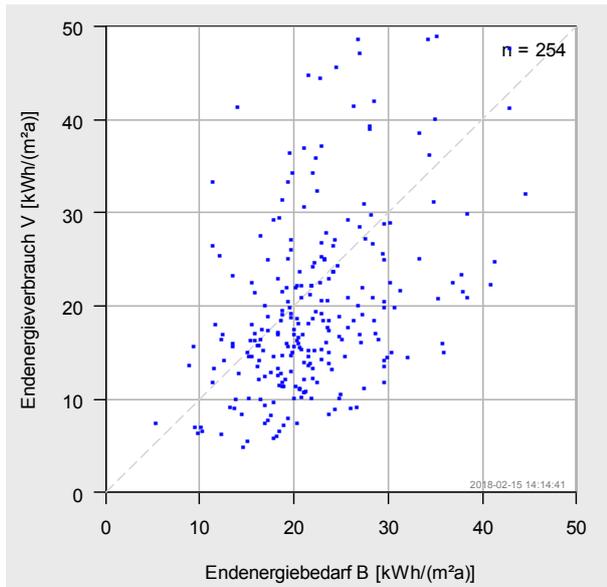


(b) Verhältnis Verbrauch/Bedarf über Bedarf

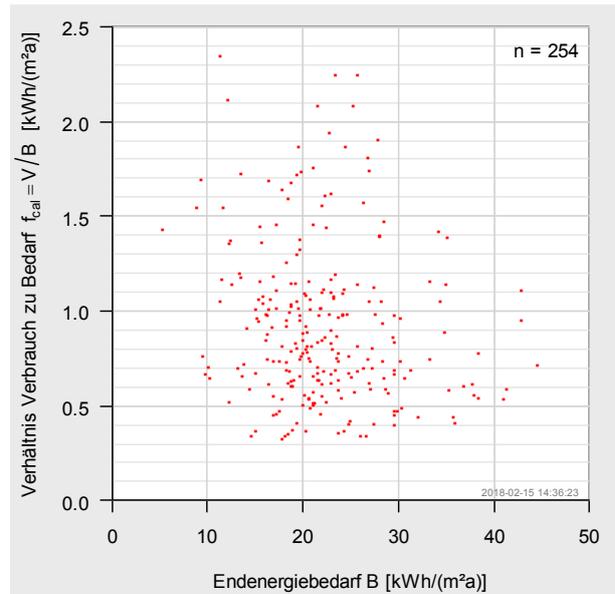
Abbildung 13 Wie Abbildung 12 zusätzlich Eintrag der Vergleichswerte aus Tabelle 6 (Kessel-Heizungen)

## 6.5.2 Wärmepumpensysteme

Nach der gleichen Systematik wie Kessel werden im Folgenden Systeme mit Wärmepumpen dargestellt. Es handelt sich dabei fast ausschließlich um Neubauten. Da fast alle Bedarfs- und Verbrauchswerte kleiner als  $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  sind, wurden die Vergleichswerte in Intervallen von  $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  gebildet.



(a) Verbrauch über Bedarf



(b) Verhältnis Verbrauch/Bedarf über Bedarf

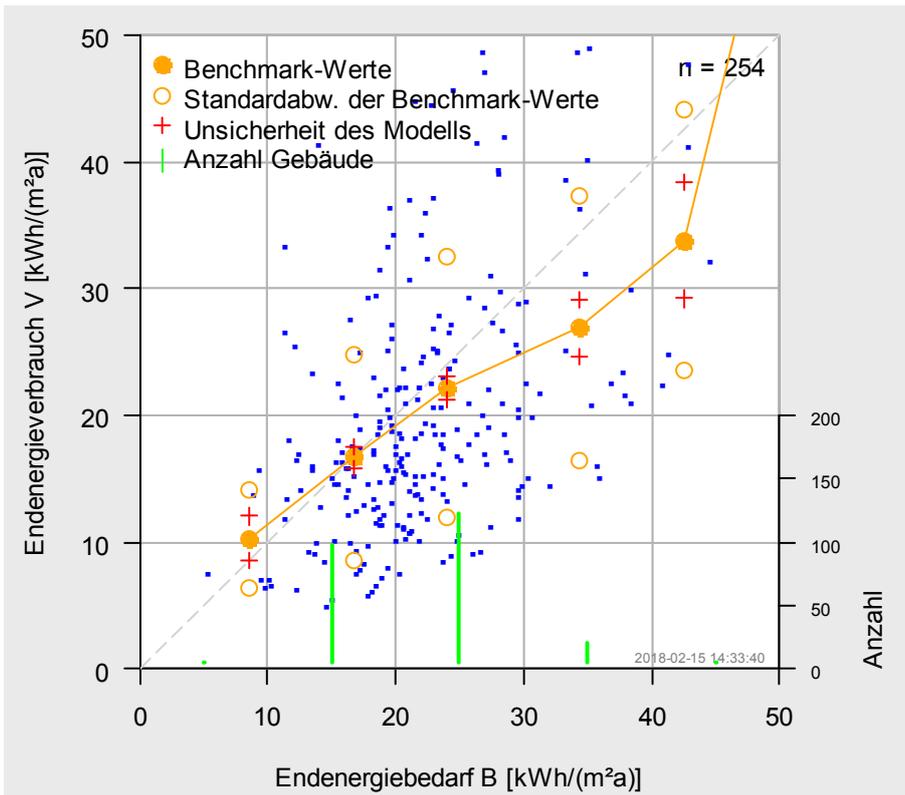
**Abbildung 14 Zusammenhang von Verbrauch und Bedarf für Gebäude mit Wärmepumpen-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereinigt**  
Angaben bezogen auf die TABULA-Referenzfläche

Tabelle 7

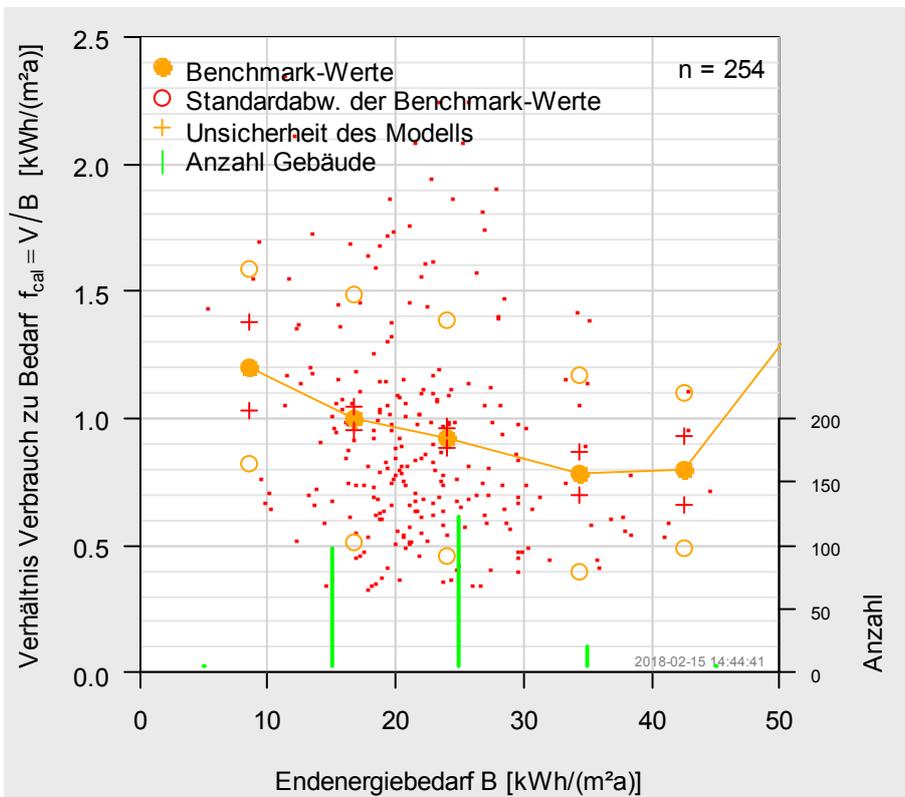
**Nach Energiebedarf differenzierte Vergleichswerte für Gebäude mit Wärmepumpen-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereinigt**

| Bedarfskennwert*   | Intervall  | >  | 0           | 10          | 20          | 30          | 40          | 50          | 60   | 70 | 80 | 90  | 100 | 110 | kWh<br>(m <sup>2</sup> a) |  |
|--|--|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|----|----|-----|-----|-----|---------------------------|--|
|  |  | ≤  | 10          | 20          | 30          | 40          | 50          | 60          | 70   | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |                           |  |
|  | Mittelwert   |    | 9           | 17          | 24          | 34          | 43          | 51          | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
| Verbrauchs-kennwert**  | Mittelwert   |    | 10          | 17          | 22          | 27          | 34          | 70          | -    | -  | -  | -   | -   | -   | kWh<br>(m <sup>2</sup> a) |  |
|  | Standard-abweichung                                |    | ± 4         | ± 8         | ± 10        | ± 10        | ± 10        | ± 39        | -    | -  | -  | -   | -   | -   | kWh<br>(m <sup>2</sup> a) |  |
| Quotient aus mittlerem Verbrauchskennwert und mittlerem Bedarfskennwert  |  |    | <b>1,20</b> | <b>1,00</b> | <b>0,92</b> | <b>0,79</b> | <b>0,80</b> | <b>1,37</b> | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
| Analyse der Quotienten Verbrauchs-kennwert zu Bedarfs-kennwert   | Mittelwert   |    | 1,23        | 1,02        | 0,92        | 0,79        | 0,79        | 1,38        | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
|  | Standard-abweichung (absolut)                      |    | ±0,46       | ±0,48       | ±0,43       | ±0,30       | ±0,24       | ±0,76       | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
|  | relative Standard-abweichung***                    |    | <b>±38%</b> | <b>±49%</b> | <b>±47%</b> | <b>±39%</b> | <b>±31%</b> | <b>±56%</b> | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
|  | relative Standard-unsicherheit des Mittelwerts**** |    | ±17%        | ±5%         | ±4%         | ±8%         | ±14%        | ±39%        | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
|  | Perzentile absolut (50 = Median)                   | 95 |             | 1,68        | 1,76        | 1,87        | 1,40        | 1,09        | 1,87 | -  | -  | -   | -   | -   | -                         |  |
|  |  | 75 |             | 1,56        | 1,18        | 1,09        | 0,97        | 0,97        | 1,65 | -  | -  | -   | -   | -   | -                         |  |
|  |  | 50 |             | 1,44        | 0,96        | 0,82        | 0,70        | 0,72        | 1,38 | -  | -  | -   | -   | -   | -                         |  |
|  |  | 25 |             | 0,77        | 0,69        | 0,63        | 0,57        | 0,61        | 1,11 | -  | -  | -   | -   | -   | -                         |  |
|  |  | 05 |             | 0,70        | 0,39        | 0,41        | 0,45        | 0,56        | 0,89 | -  | -  | -   | -   | -   | -                         |  |
|  | Perzentile relativ (bezogen auf Median)            | 95 |             | +17%        | +83%        | +129%       | +99%        | +50%        | +35% | -  | -  | -   | -   | -   | -                         |  |
| 75   |  |    | +8%         | +23%        | +34%        | +38%        | +33%        | +20%        | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
| 25   |  |    | -46%        | -29%        | -22%        | -19%        | -16%        | -20%        | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
| 05   |  |    | -51%        | -60%        | -49%        | -36%        | -22%        | -35%        | -    | -  | -  | -   | -   | -   |                           |  |
| Anzahl Datensätze  |  |    | 5           | 98          | 123         | 21          | 5           | 2           | 0    | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   |                           |  |
| <p>*) Norm-Energiebedarf für Heizung und Warmwasser, berechnet nach TABULA unter Verwendung der realen lokalen Klimadaten; Flächenbezug: Nettogrundfläche (TABULA-Bezugsfläche)</p> <p>**) gemessener Jahresverbrauch für Heizung und Warmwasser; Flächenbezug: Nettogrundfläche (TABULA-Bezugsfläche); Standardabweichung mittelbar bestimmt über die relative Standardabweichung des Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnisses</p> <p>***) relative Standardabweichung: bezogen auf den Quotienten der beiden Mittelwerte; Grundlage für die "Standardabweichung Verbrauchskennwert"</p> <p>****) relative Standardunsicherheit des Mittelwerts, auch bezeichnet als relativer Standardfehler</p> |  |    |             |             |             |             |             |             |      |    |    |     |     |     |                           |  |

Datenstand: 15-02-2018



**(a) Verbrauch über Bedarf**



**(b) Verhältnis Verbrauch/Bedarf über Bedarf**

**Abbildung 15** Wie Abbildung 14, zusätzlich Eintrag der Vergleichswerte aus Tabelle 7 (Wärmepumpen-Heizungen)

## 6.6 Ermittlung einer Funktion zur Kalibrierung der Standardberechnung auf das typische Verbrauchsniveau

Wie man in Abbildung 12 sieht, ist die Standardabweichung deutlich abhängig vom Bedarfswert. Je größer der Bedarf, umso größer ist auch die Streuung des Verbrauchs, die Punktwolke öffnet sich trichterförmig zu höheren Bedarfswerten hin, wenn man von den Kategorien über 300 kWh/(m<sup>2</sup>a) absieht, bei denen nur wenige Fälle vorhanden sind. Daher wird entsprechend der Argumentation in [Hörner et al. 2016] eine nicht-lineare Transformation in Form einer Logarithmierung der Variablen durchführt. Dies entspricht dem Vorgehen, das auch bei der Ermittlung der Anpassungsfunktionen in Kapitel 4 angewendet wurde.

Nach Logarithmierung der beiden Größen kann man folgende lineare Regressionsgleichung aufstellen:

$$(1) \quad \text{Ln}(\hat{q}_{del,m}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln}(q_{del,c})$$

|     |                    |  |                          |
|-----|--------------------|--|--------------------------|
| mit | $\hat{q}_{del,m}$  | Schätzwert für den Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser, bezogen auf die beheizte Wohnfläche | [kWh/(m <sup>2</sup> a)] |
|     | $q_{del,c}$        | Norm-Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser, bezogen auf die beheizte Wohnfläche                  | [kWh/(m <sup>2</sup> a)] |
|     |                    | <i>Bezug auf Heizwert oder Brennwert bei beiden Größen jeweils gleich</i>                              |                          |
|     | $\beta_1, \beta_2$ | Regressionskoeffizienten   |                          |

Der Schätzwert des Verbrauchs berechnet sich somit aus der Beziehung:

$$(2) \quad \hat{q}_{del,m} = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Ln}(q_{del,c})} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$$

$$= q_{del,c}^{\beta_1} \cdot e^{\beta_0}$$

### 6.6.1 Kessel / Brennstoffe

Aus der Regression auf die Daten für Kessel-Systeme ergeben sich folgende Werte für die Koeffizienten:

$$\beta_0 = 1,25$$

$$\beta_1 = 0,70$$

Damit ergibt sich folgende Funktion für die Ermittlung des Schätzwerts des Verbrauchs:

$$(3) \quad \hat{q}_{del,m} = q_{del,c}^{0,7} \cdot e^{1,25} = 3,48 q_{del,c}^{0,7} \quad [\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$$

Die Standardabweichung beträgt  $\hat{\sigma}(\ln(\hat{q}_{del,m})) = \pm 0,36$  des geschätzten logarithmierten Verbrauchs, d. h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 % wird der Logarithmus des gemessenen Verbrauchs in diesem Intervall um den Schätzwert liegen.

Bezogen auf den Schätzwert des (nicht logarithmierten) Verbrauchs  $\hat{q}_{del,m}$  würde sich diese Standardabweichung als Faktor  $e^{\pm 0,36} = e^{\pm 0,36}$  bemerkbar machen, also als Faktor 1,43 für das obere und 0,70 für das untere Intervall.

Abbildung 16 a zeigt die Verbrauchs-Bedarfs-Datenpunkte bei Darstellung mit logarithmierten Achsen sowie die auf dieser Basis durchgeführte lineare Regression. Etwa die Hälfte der Streuung kann durch das Modell erklärt werden ( $R^2 = 0,48$ ).

Bei Abbildung 16 b handelt es sich im Prinzip um die gleiche Darstellung, jedoch geben die logarithmischen Achsen direkt Verbrauch und Bedarf ohne Transformation wieder. Die entsprechenden Werte können also direkt abgelesen werden. In Abbildung 16 c ist dann noch einmal das Gleiche mit linearen Achsen dargestellt: Aus der bei transformierten Variablen konstanten Streubreite (Standardabweichung, rote gepunktete Linien) wird eine relative. Damit liegen 68 % der Fälle in einem Bereich, der durch die mit den Faktoren  $e^{+0,36} = 1,43$  und  $e^{-0,36} = 0,70$  multiplizierten Schätzfunktion aufgespannt wird.

Abbildung 16 d zeigt dann das Modell für das Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis aufgetragen über dem Bedarf auf jeweils linearen Achsen. Der aus der Standardabweichung des Modells resultierende Streubereich liegt bei dieser Darstellung konstant zwischen +0,36 und -0,36, bezogen auf das Modell, ist also unabhängig vom Bedarfswert.

Eine Umformung von Gleichung (3) ergibt das geschätzte Verhältnis aus Verbrauch und Bedarf, der auch direkt als Kalibrierungsfaktor angewendet werden kann:

$$(4) \quad \hat{f}_{cal} = \frac{\hat{q}_{del,m}}{q_{del,c}} = \frac{q_{del,c}^{\beta_1} \cdot e^{\beta_0}}{q_{del,c}} = q_{del,c}^{\beta_1-1} \cdot e^{\beta_0}$$

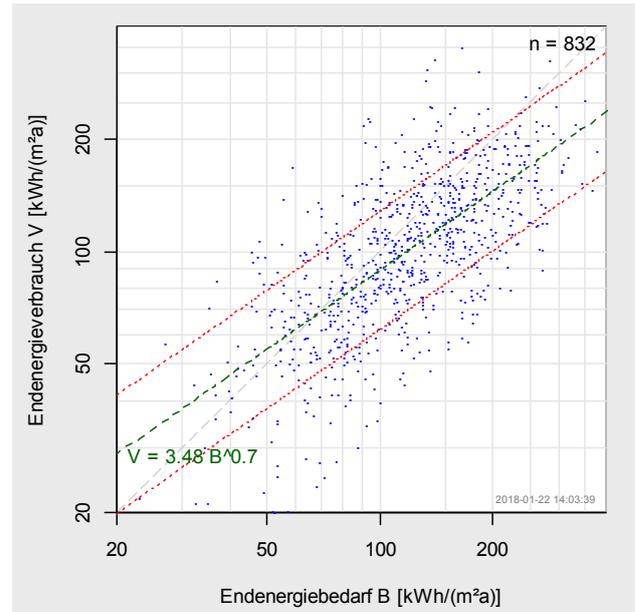
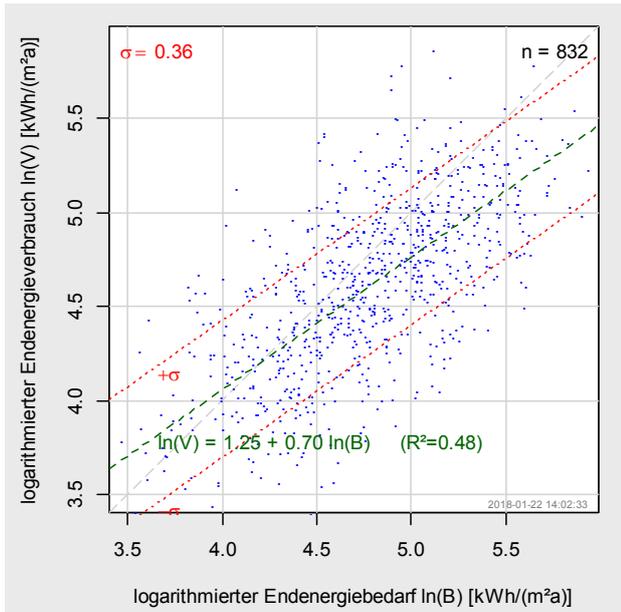
Mit den Koeffizienten aus der Regression ( $\beta_0 = 1,25$  und  $\beta_1 = 0,70$ ) ergibt sich aus der vorliegenden Stichprobe die folgende Kalibrierungsfunktion:

$$(5) \quad \hat{f}_{cal} = e^{1,25} \cdot q_{del,c}^{-0,3} = 3,48 q_{del,c}^{-0,3}$$

Der typische Streubereich wird wie oben dargestellt aus der aus der Analyse der logarithmierten Größen gebildeten Standardabweichung ermittelt. Es ergeben sich für die obere und die untere Grenze des Streubereichs, in dem sich 68% der Fälle befinden:

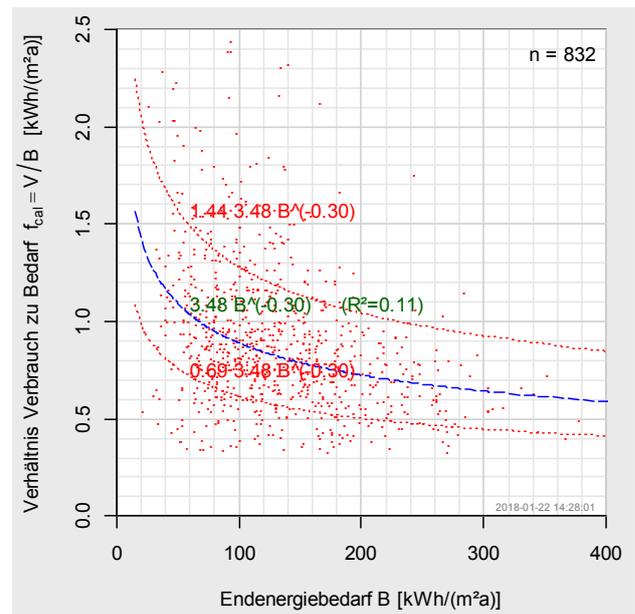
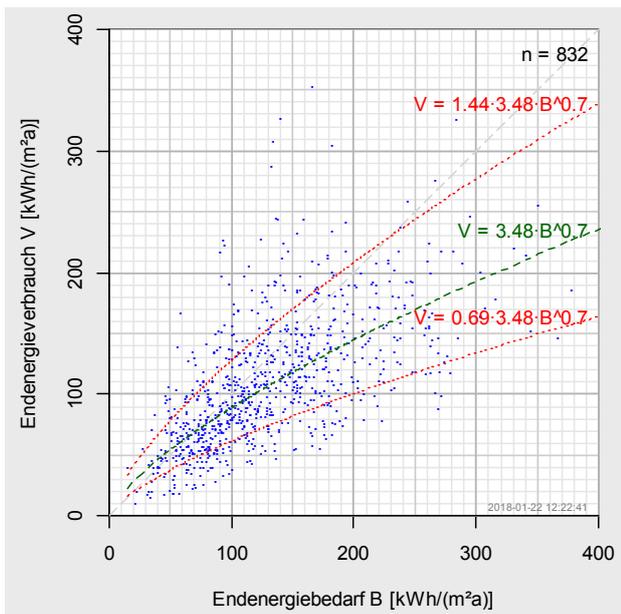
$$(6) \quad \begin{aligned} \hat{f}_{cal,sup} &= 1,43 \cdot 3,48 q_{del,c}^{-0,3} = 4,97 q_{del,c}^{-0,3} \\ \hat{f}_{cal,inf} &= 0,70 \cdot 3,48 q_{del,c}^{-0,3} = 2,45 q_{del,c}^{-0,3} \end{aligned}$$

Die Diagramme in Abbildung 16 zeigen die Schätzfunktion für den Energieverbrauch und die Kalibrierungsfunktion, jeweils als Funktion des Energiebedarfs. Die Diagramme in Abbildung 17 zeigen zusätzlich noch einmal die Vergleichswerte (Benchmarks).



(a) Darstellung  $\ln(q_{del,m})$  als Funktion von  $\ln(q_{del,c})$  – lineare Skalierung beider Diagrammachsen

(b) Darstellung  $q_{del,m}$  als Funktion von  $q_{del,c}$  – logarithmische Skalierung beider Diagrammachsen



(c) Darstellung  $q_{del,m}$  als Funktion von  $q_{del,c}$  – lineare Skalierung beider Diagrammachsen

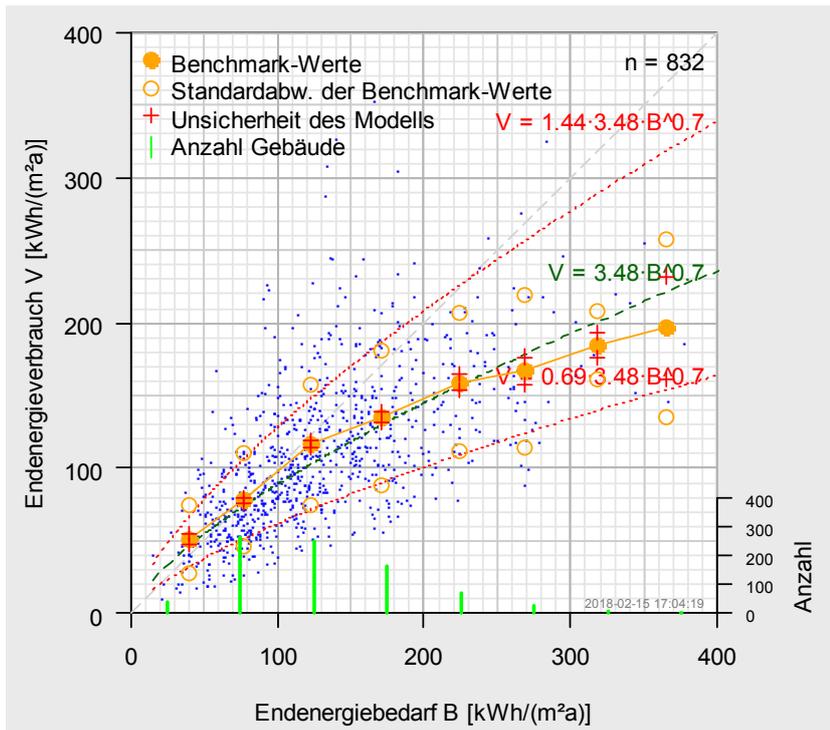
(d) Darstellung des Quotienten  $q_{del,m} / q_{del,c}$  als Funktion von  $q_{del,c}$  – lineare Skalierung beider Diagrammachsen

**Abbildung 16 Stichprobe und lineare Regressionsgleichung der logarithmierten Variablen /verschiedene Darstellungen**

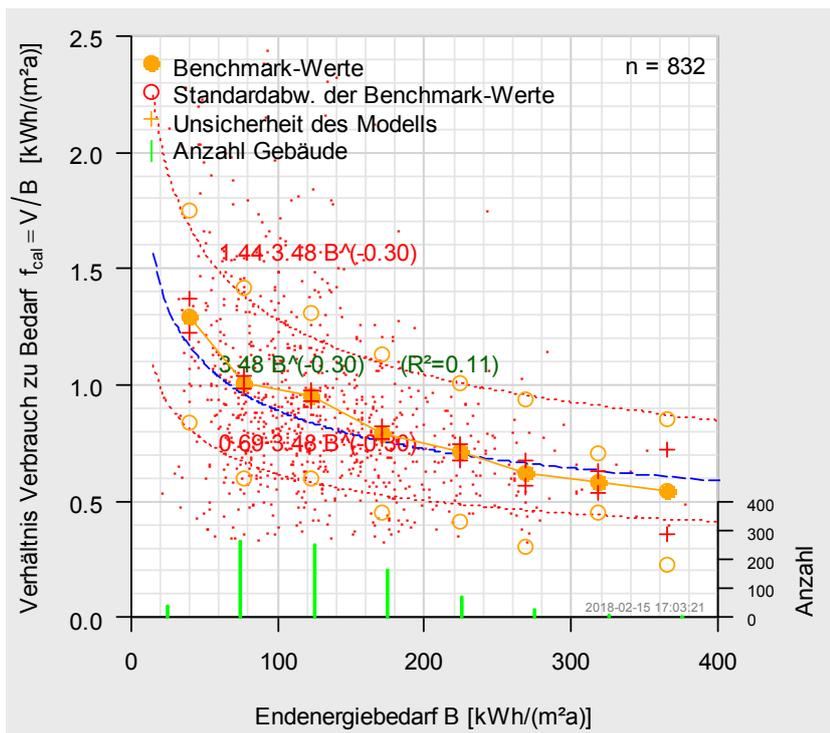
(Zuordnung Formelzeichen bei den Achsenbeschriftungen:  $V = q_{del,m}$ ;  $B = q_{del,c}$ )

jeweils mit Angabe der Regressionsformel, des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  und der Standardabweichung  $\sigma$

Gebäude mit Kessel-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereinigt



(a) Verbrauch über Bedarf



(b) Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis über Bedarf (Kalibrierungsfunktion)

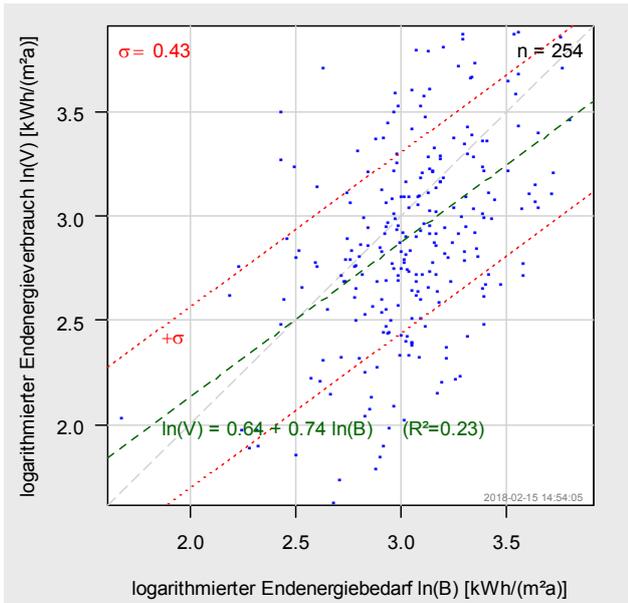
Abbildung 17 Vergleich der durch Regression ermittelten Schätzfunktion für den Verbrauch mit den Werten der Vergleichswerttabelle.

(Zuordnung Formelzeichen bei den Achsenbeschriftungen:  $V = q_{del,m}$ ;  $B = q_{del,c}$ )

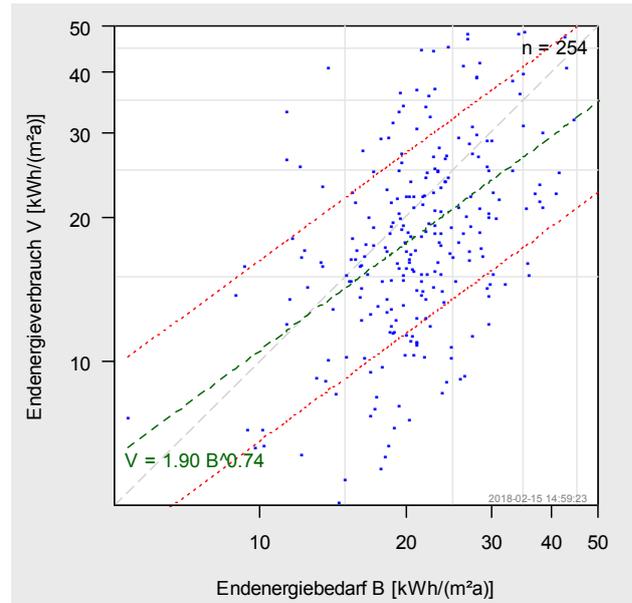
Gebäude mit Kessel-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereinigt

## 6.6.2 Wärmepumpensysteme

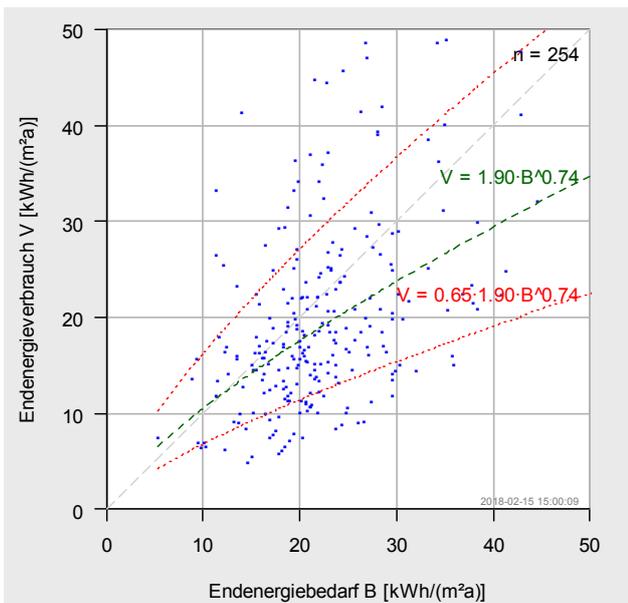
Eine analoge Analyse wurde für die Wärmepumpensysteme durchgeführt. Die Kurvenform der resultierenden Kalibrierungsfunktion verläuft sehr ähnlich wie die Funktion der Kesselsysteme, mit dem Unterschied, dass die Bedarfs-Skala etwa um den Faktor vier kleiner ist. Beachtet werden muss, dass ein Großteil der Varianz nicht durch das Modell erklärt werden kann ( $R^2 = 0,23$ ). Die Einbeziehung weiterer Parameter in die Regression könnte gegebenenfalls eine Verbesserung des Modells erlauben.



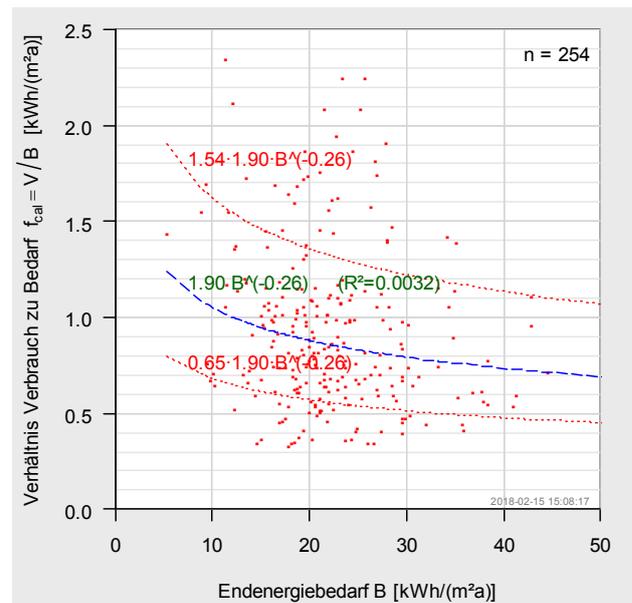
(a) Darstellung  $\ln(q_{del,m})$  als Funktion von  $\ln(q_{del,c})$  – lineare Skalierung beider Diagrammachsen



(b) Darstellung  $q_{del,m}$  als Funktion von  $q_{del,c}$  – logarithmische Skalierung beider Diagrammachsen



(c) Darstellung  $q_{del,m}$  als Funktion von  $q_{del,c}$  – lineare Skalierung beider Diagrammachsen

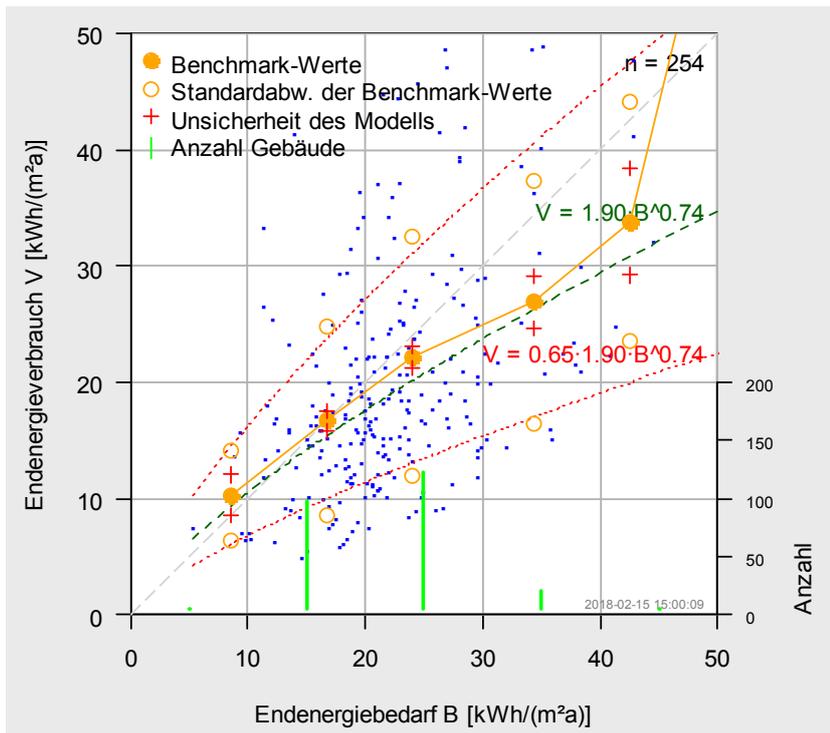


(d) Darstellung des Quotienten  $q_{del,m} / q_{del,c}$  als Funktion von  $q_{del,c}$  – lineare Skalierung beider Diagrammachsen

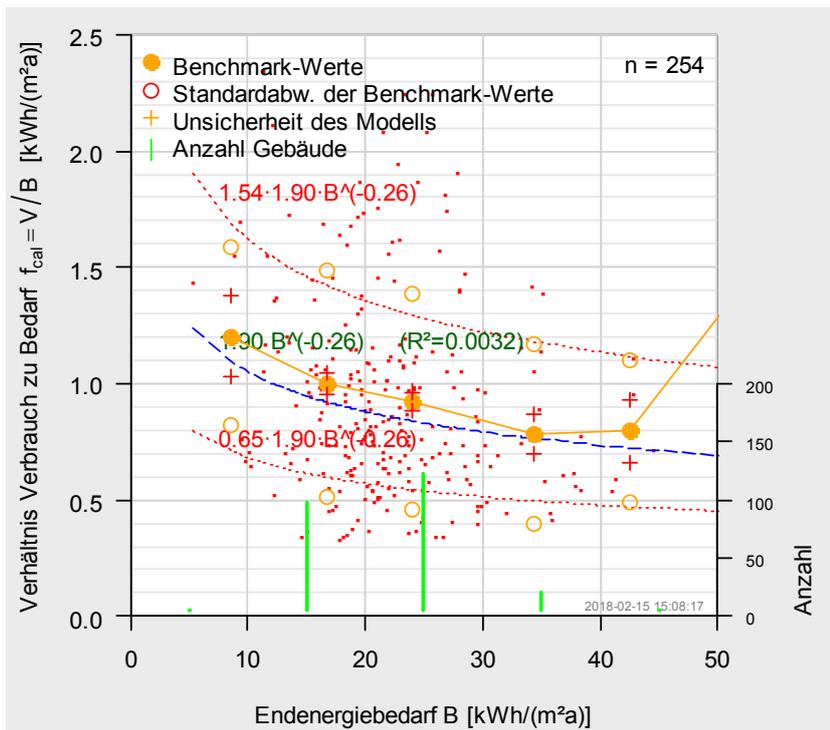
**Abbildung 18 Stichprobe und lineare Regressionsgleichung der logarithmierten Variablen / verschiedene Darstellungen**

(Zuordnung Formelzeichen bei den Achsenbeschriftungen:  $V = q_{del,m}$ ;  $B = q_{del,c}$ )  
jeweils mit Angabe der Regressionsformel, des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  und der Standardabweichung  $\sigma$

Gebäude mit Wärmepumpen-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereinigt



(a) Verbrauch über Bedarf



(b) Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis über Bedarf (Kalibrierungsfunktion)

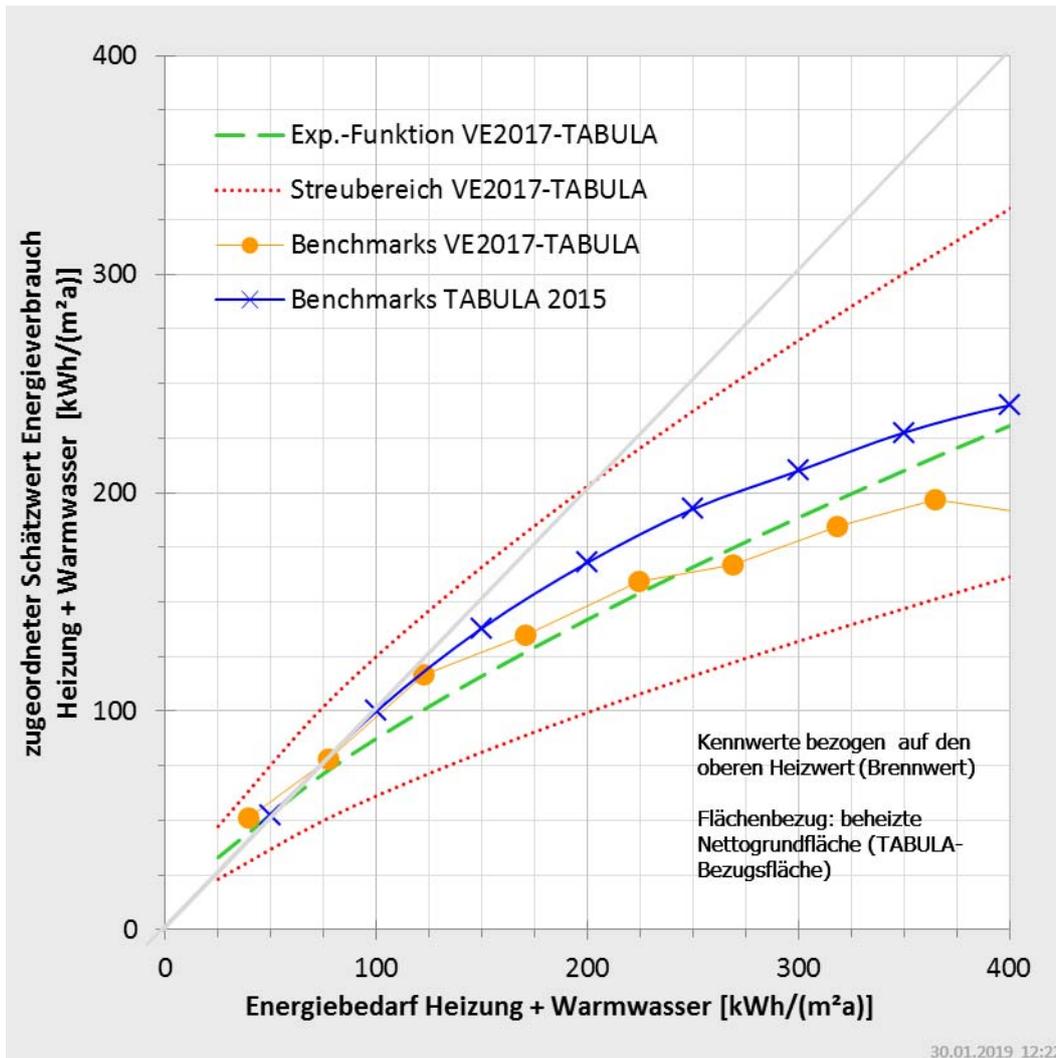
**Abbildung 19 Vergleich der durch Regression ermittelten Schätzfunktion für den Verbrauch mit den Werten der Vergleichswerttabelle.**

(Zuordnung Formelzeichen bei den Achsenbeschriftungen:  $V = q_{del,m}$ ;  $B = q_{del,c}$ )

Gebäude mit Wärmepumpen-Heizungen; kombinierte Systeme für Heizung und Warmwasser; TABULA-Standard-Berechnung mit lokalem Real-Klima, Verbrauch nicht klimabereinigt

### 6.6.3 Vergleich mit bisherigen TABULA-Kalibrierungsfaktoren

Die folgende Abbildung zeigt für den Fall Kessel/Brennstoffe einen Vergleich des Verlaufs der Schätzfunktionen für den Verbrauch bzw. der Benchmark-Werte mit der bisherigen im TABULA-Verfahren verwendeten Schätzung [Loga et al. 2015], die auf einer in [Knissel et al. 2006] dokumentierten Analyse basiert. Es zeigt sich, dass die neue Funktion im Bereich von mehr als 150 kWh/(m<sup>2</sup>a) Energiebedarf etwas flacher ausfällt – bei den weniger gut gedämmten Gebäuden liegt der mittlere Verbrauch also bei gleichem Bedarf niedriger.



**Abbildung 20: Schätzfunktionen für den Energieverbrauch**  
**Vergleich zwischen den Ergebnissen der Verbrauchserhebung 2017**  
**(VE2017-TABULA) und den bisherigen Benchmarks (TABULA 2015)**  
**Versorgungssysteme: Kessel / Brennstoffe**

## 7 Auswertung der Angaben zum Nutzerverhalten in den Einfamilienhäusern

### 7.1 Übersicht über die Angaben und Differenzierung nach energetischer Qualität der Gebäudehülle

Im Fall von Einfamilienhäusern wurden auch Angaben zur Nutzung im Verbrauchszeitraum abgefragt. Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die Ergebnisse. Es wird nach der energetischen Qualität der Gebäudehülle differenziert. Als Parameter dient dabei der aus den Angaben der Gebäudeeigentümer zu Baualter und Wärmeschutz ermittelte Wärmetransferkoeffizient Transmission, bezogen auf die Energiebezugsfläche. Beachtet werden muss, dass Gebäude mit sehr hohen Transmissionswärmeverlusten in nur geringer Anzahl vertreten sind, die angegebenen Zahlen also deutlich größere Unsicherheiten aufweisen als für die besseren Gebäude. Weiterhin muss bei der Interpretation der Ergebnisse natürlich bedacht werden, dass die Angaben der Gebäudeeigentümer nicht notwendigerweise das tatsächliche Verhalten abbilden. Die Ergebnisse für die verschiedenen Fragen sind:

- Raumtemperatur (Abbildung 21): Gemäß den Angaben der Gebäudeeigentümer lag die winterliche Raumtemperatur im beheizten Bereich tagsüber im Mittel bei 21,7 °C bei den energetisch hochwertigen Gebäuden und bei ca. 21,0 °C bei den unsanierten Bestandsgebäuden.
- räumliche Teilbeheizung (Abbildung 22): Bei grob der Hälfte der Gebäudeeigentümer liegt der Anteil nicht oder nur selten beheizter Flächen bei weniger als 10 %. Bei den energetisch sehr guten Gebäuden liegt der Anteil am höchsten, nämlich bei ca. 65 %. Gebäude, bei denen mehr als 50 % der Fläche selten beheizt sind, sind bei den energetisch hochwertigen Gebäuden nur sehr selten (weniger als 2 % der Gebäude), bei den ungedämmten Gebäuden trifft dies für 10 % der Gebäude zu (allerdings ist die Fallzahl hier sehr gering).
- Nachtabenkung (Abbildung 23): Während bei den schlecht gedämmten Gebäuden mehr als 90 % mit Nachtabenkung betrieben werden, sind dies bei den energetisch hochwertigen Gebäuden deutlich weniger, nämlich nur 60 %.
- Öffnen von Fenstern (Abbildung 24): Grob 80 % der Eigentümer sagen, dass bei ihnen im Winter ein oder mehrere Fenster höchstens eine halbe Stunde gekippt oder ganz geöffnet werden. Den höchsten Fensteröffnungsanteil hat die zweitbeste Wärmeschutzkategorie: In 10 % der Gebäude werden die Fenster 3 bis 8 Stunden oder sogar länger geöffnet<sup>29</sup>.
- Angaben zur Besonnung (Abbildung 25): Fast 70 % der Eigentümer energieeffizienter Gebäude geben an, dass im Winter viel Sonne durch die Fenster scheint. Bei den schlechteren Gebäudekategorien sind es ca. 50 %<sup>30</sup>.
- Betätigung von Verschattungseinrichtungen im Winter (Abbildung 26): Bei ca. jedem zehnten Gebäude wird im Winter die Sonneinstrahlung normalerweise mit außen liegenden Jalousien, Rollläden oder ähnlichen Vorrichtungen reduziert.
- Personenzahl (Abbildung 27): Die Personenzahl liegt bei den hocheffizienten Gebäuden im Mittel bei ca. 3,1 je Gebäude, bei den schlechteren Gebäuden bei ca. 2,4 je Gebäude.

---

<sup>29</sup> Im Zuge differenzierterer Auswertungen könnte noch eine weitere Differenzierung in Gebäude mit und ohne Lüftungsanlage stattfinden.

<sup>30</sup> Im Zuge differenzierterer Auswertungen wäre ggf. eine Unterscheidung zwischen Neubau und modernisiertem Bestand sinnvoll.

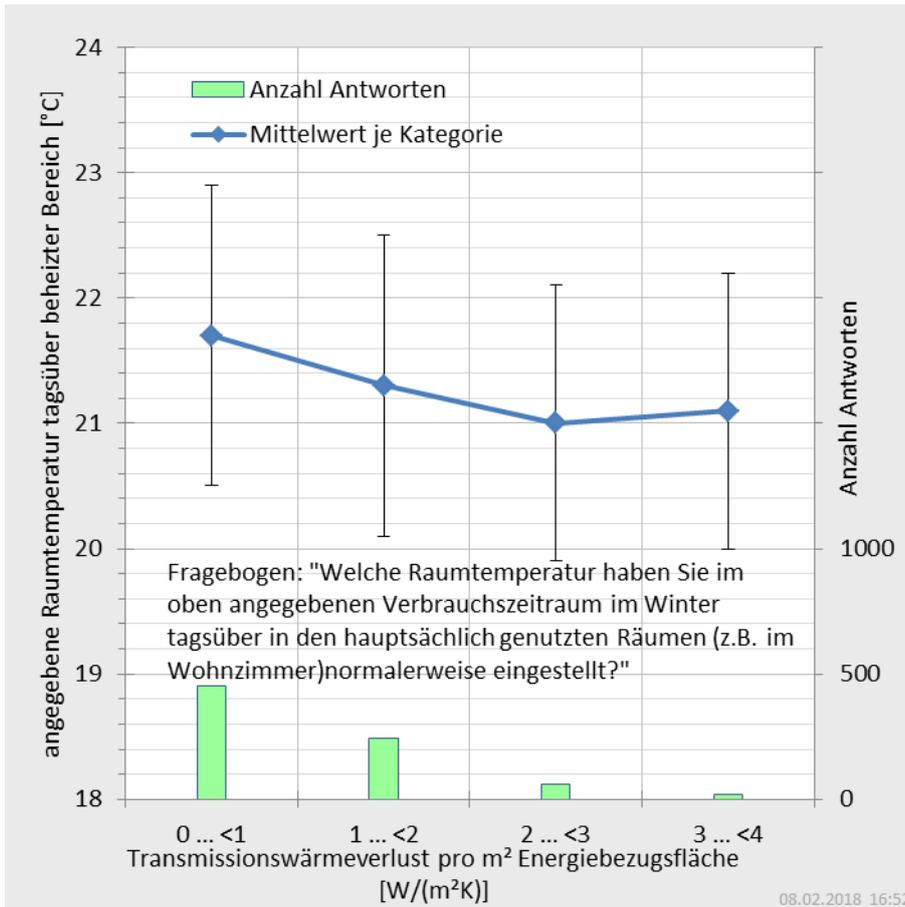


Abbildung 21:

Mittelwerte und Standardabweichungen der Angaben zur Raumtemperatur, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes

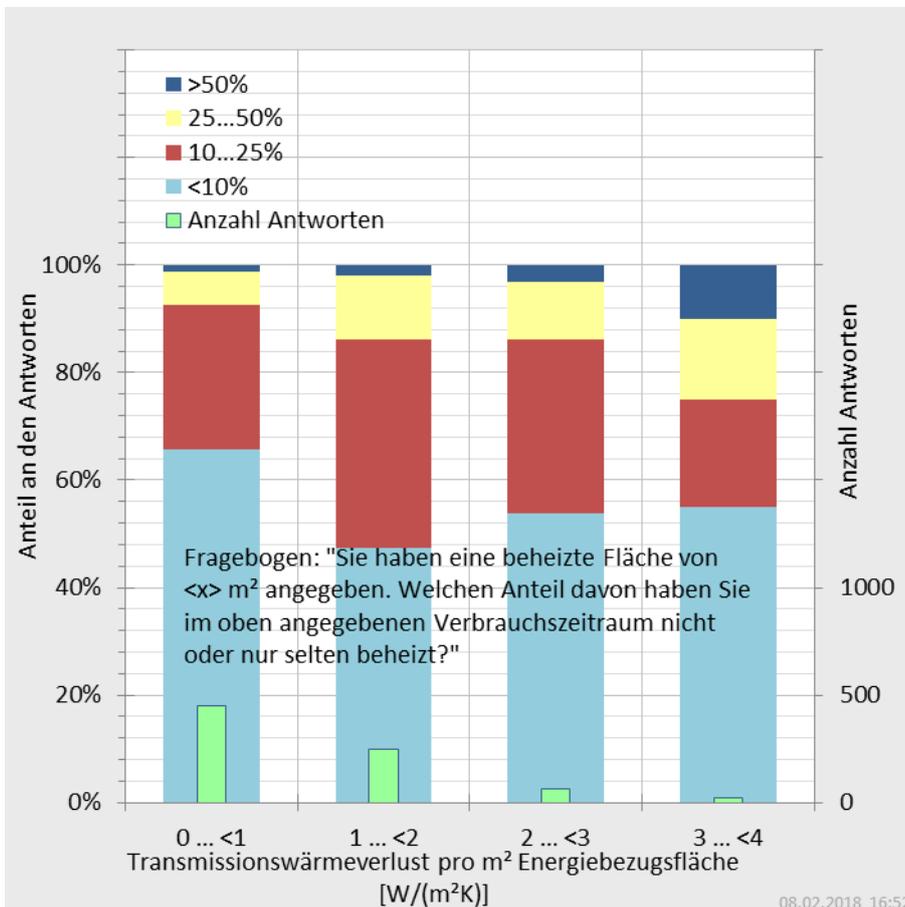


Abbildung 22:

Angaben zu selten beheizten Flächenanteilen, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes

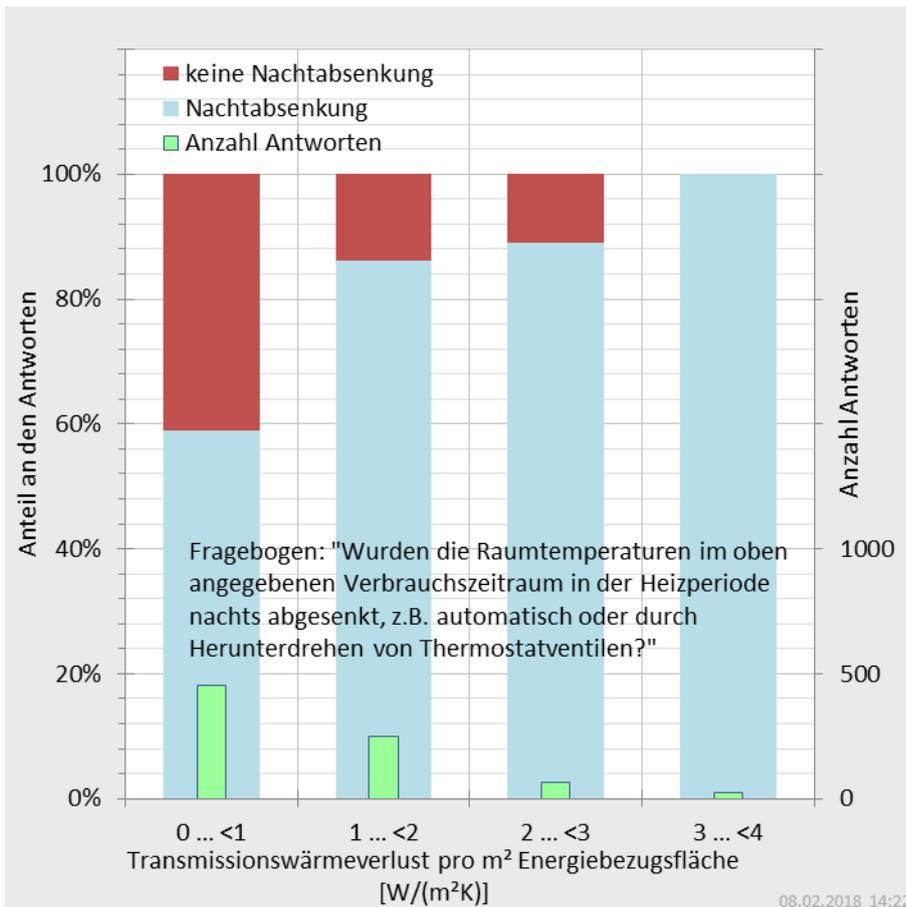


Abbildung 23:

Angaben zur Nachtabsenkung, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes

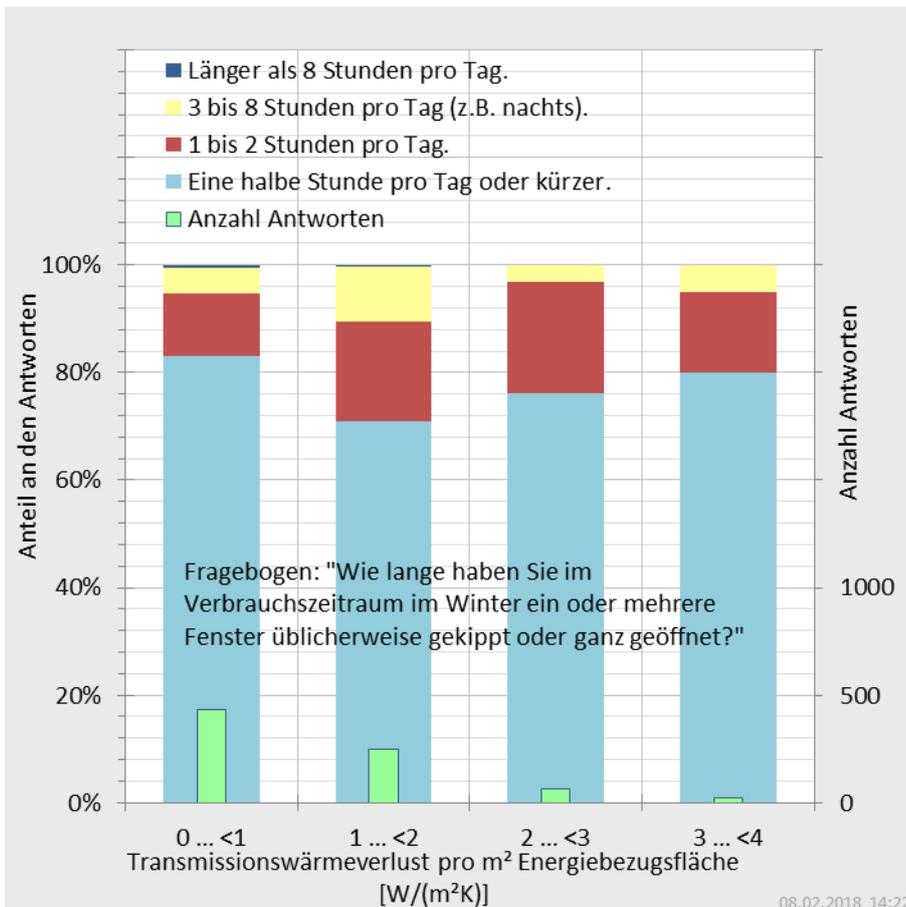


Abbildung 24:

Angaben zum Öffnen von Fenstern im Winter, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes

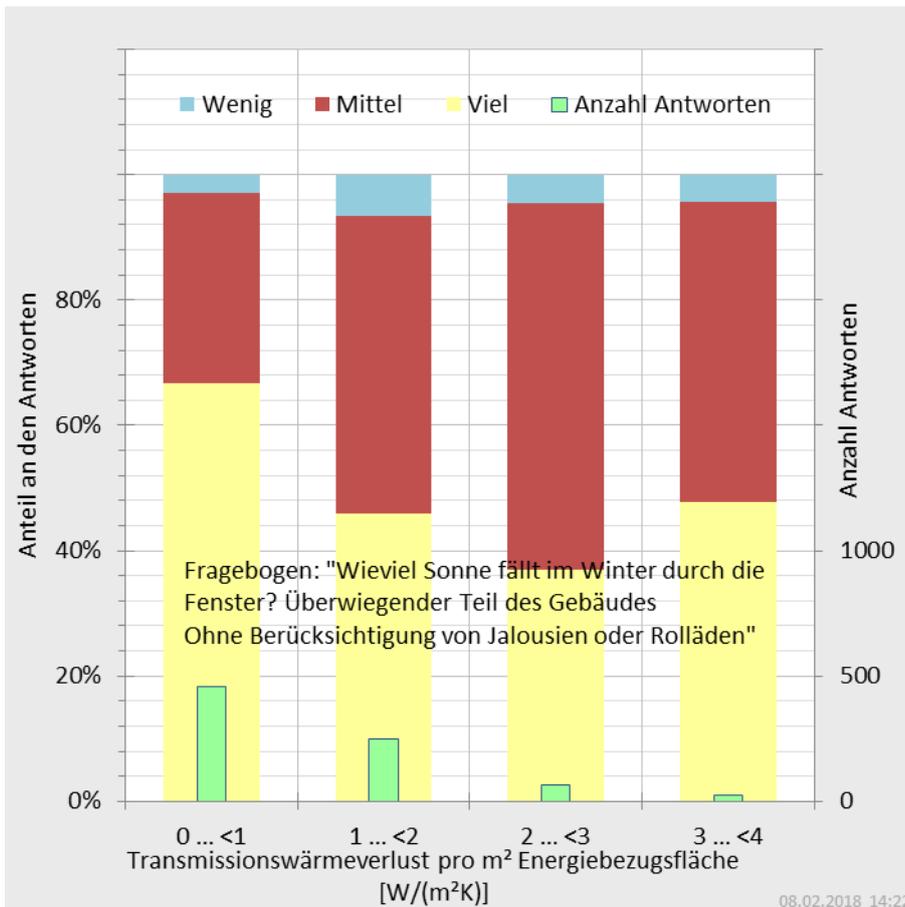


Abbildung 25:

Angaben zur Besonnung, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes

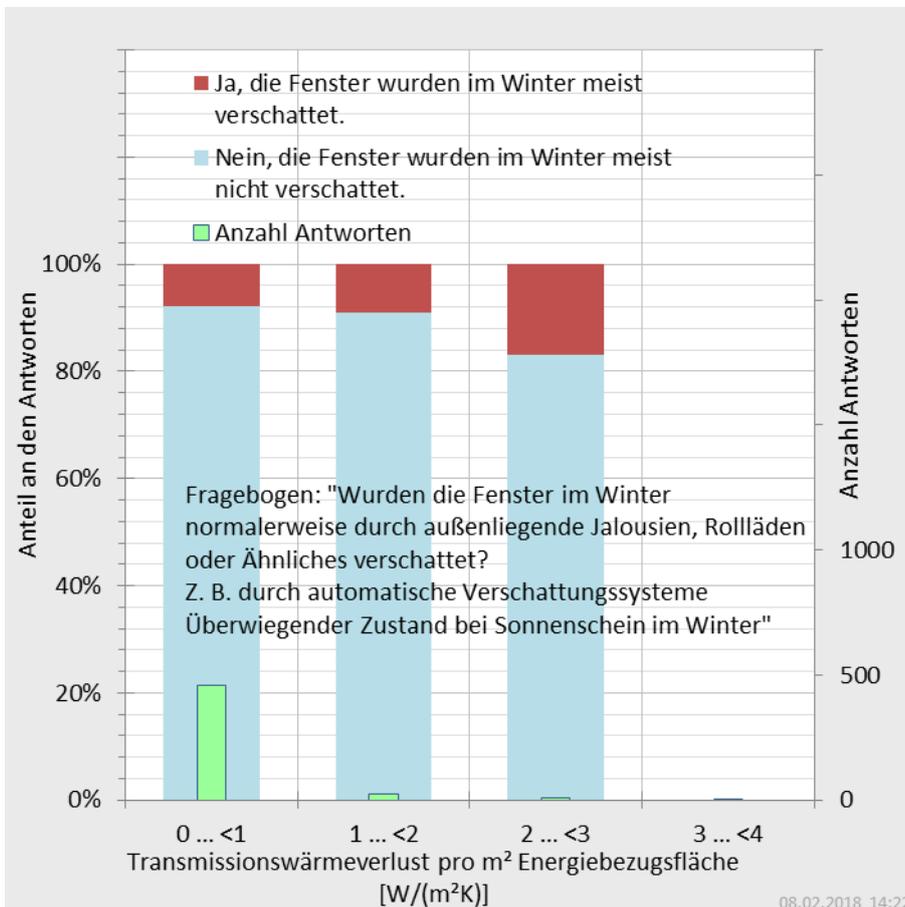
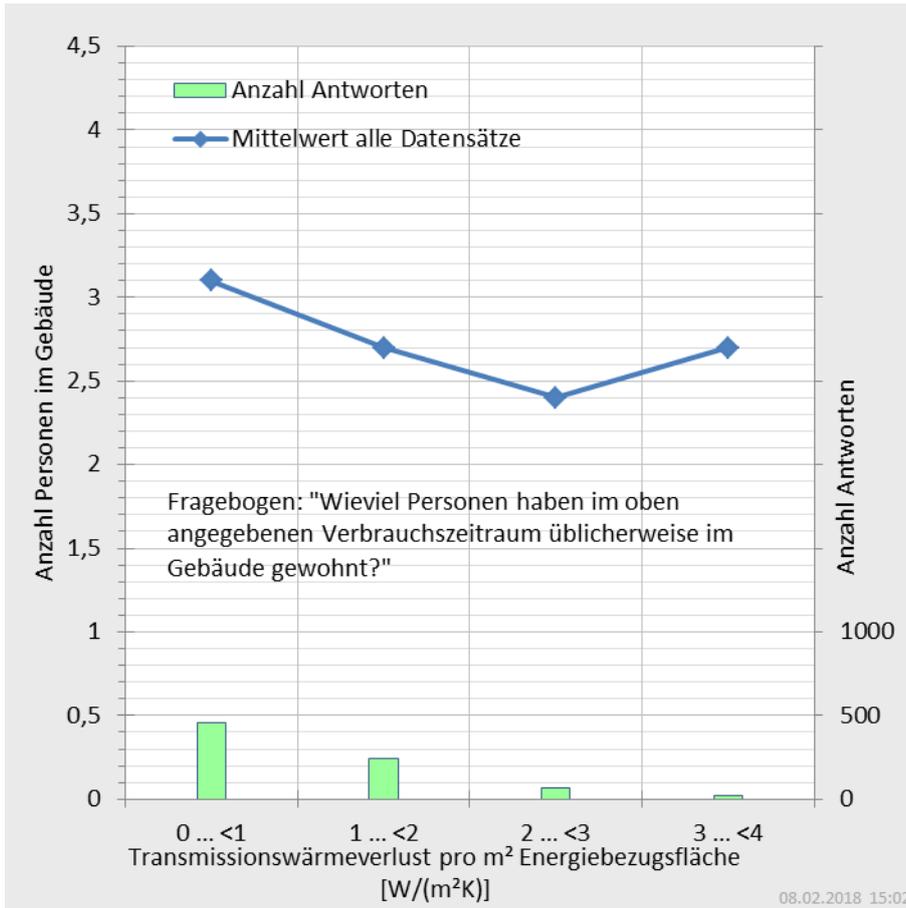


Abbildung 26:

Angaben zur Betätigung von Verschattungseinrichtungen im Winter, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes



**Abbildung 27:**

**Angaben zur Personen-  
zahl, differenziert nach  
der energetischen Quali-  
tät des Gebäudes**

## 7.2 Zusammenhang zwischen angegebener Nutzung und Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

In den folgenden Abbildungen wird abhängig von dem ermittelten Verhältnis aus Verbrauchs- und Bedarfswerten eine Aufteilung der Gebäude in zwei Hälften vorgenommen:

- „niedriges Verhältnis V/B“
- „höheres Verhältnis V/B“.

Der bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellte Mittelwert aller Gebäude ist ebenfalls dargestellt. Zusammengefasst zeigen sich nur sehr schwache Zusammenhänge zwischen den Angaben zur Nutzung und dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis.

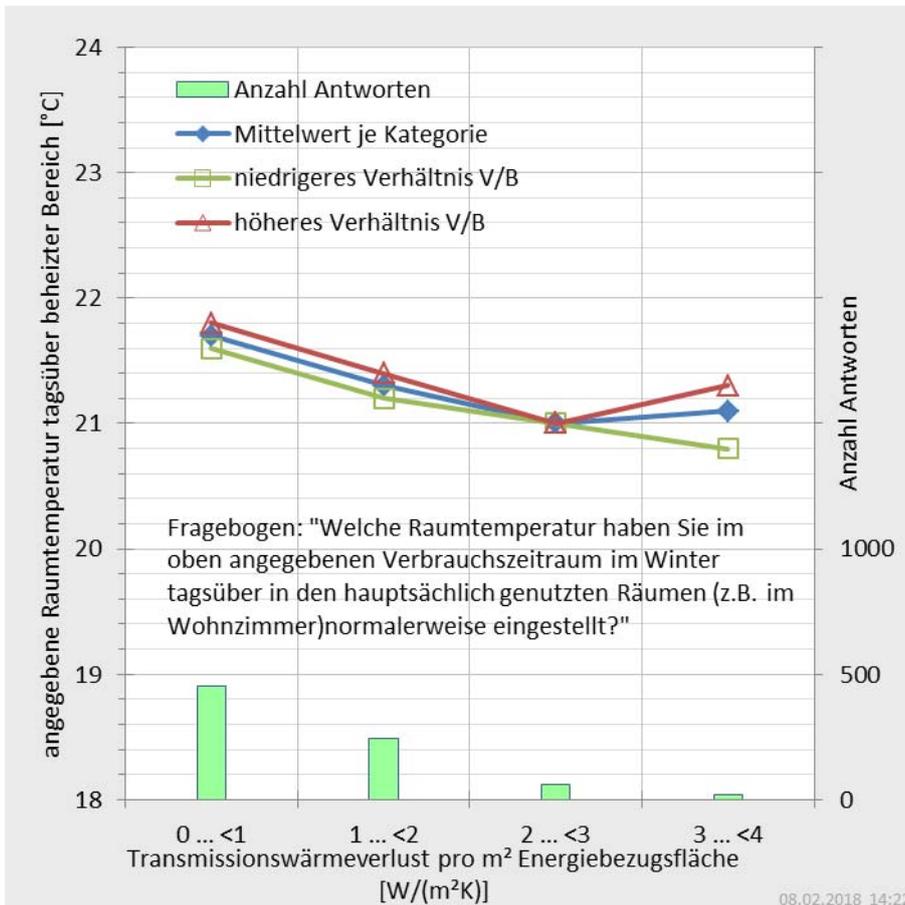


Abbildung 28:

Mittelwerte der Angaben zur Raumtemperatur, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes und nach dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

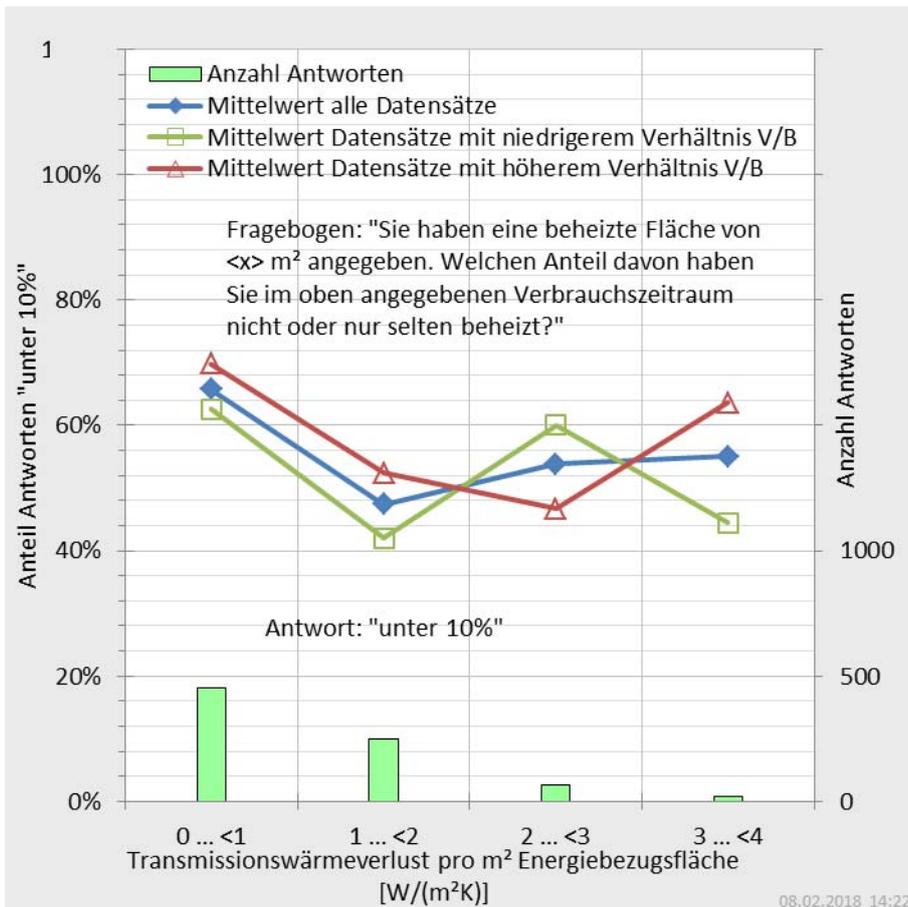


Abbildung 29:

Angaben zu selten beheizten Flächenanteilen, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes und nach dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

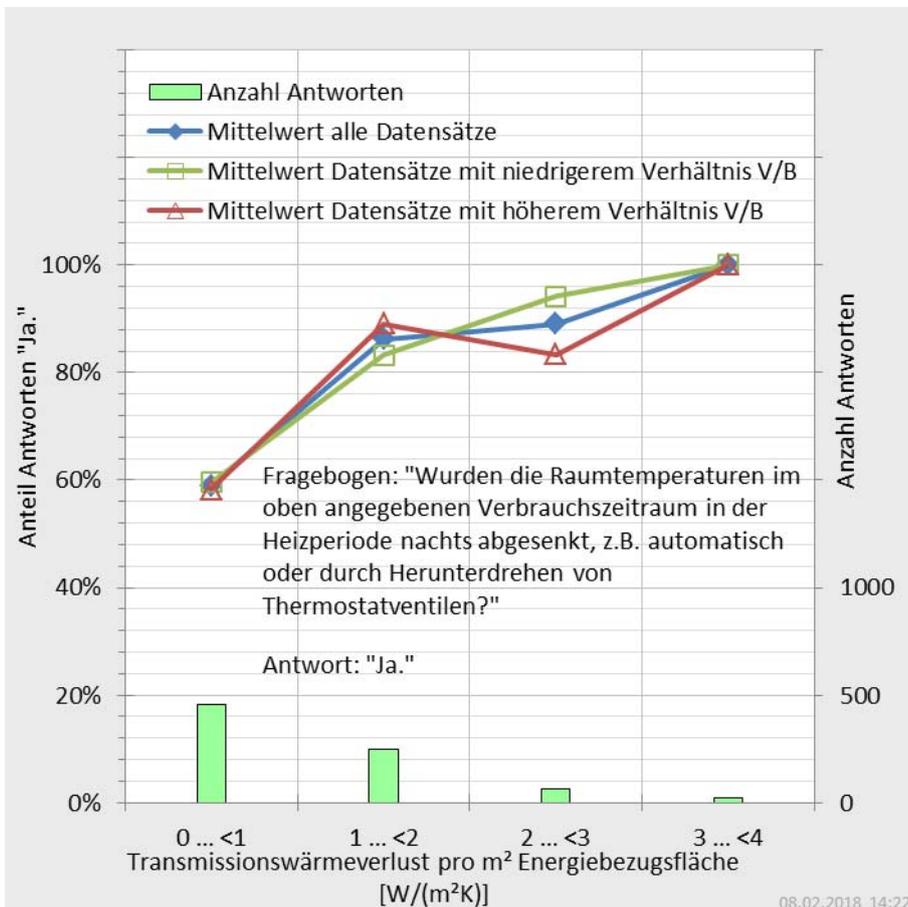


Abbildung 30:

Angaben zur Nachtabsenkung, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes und nach dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

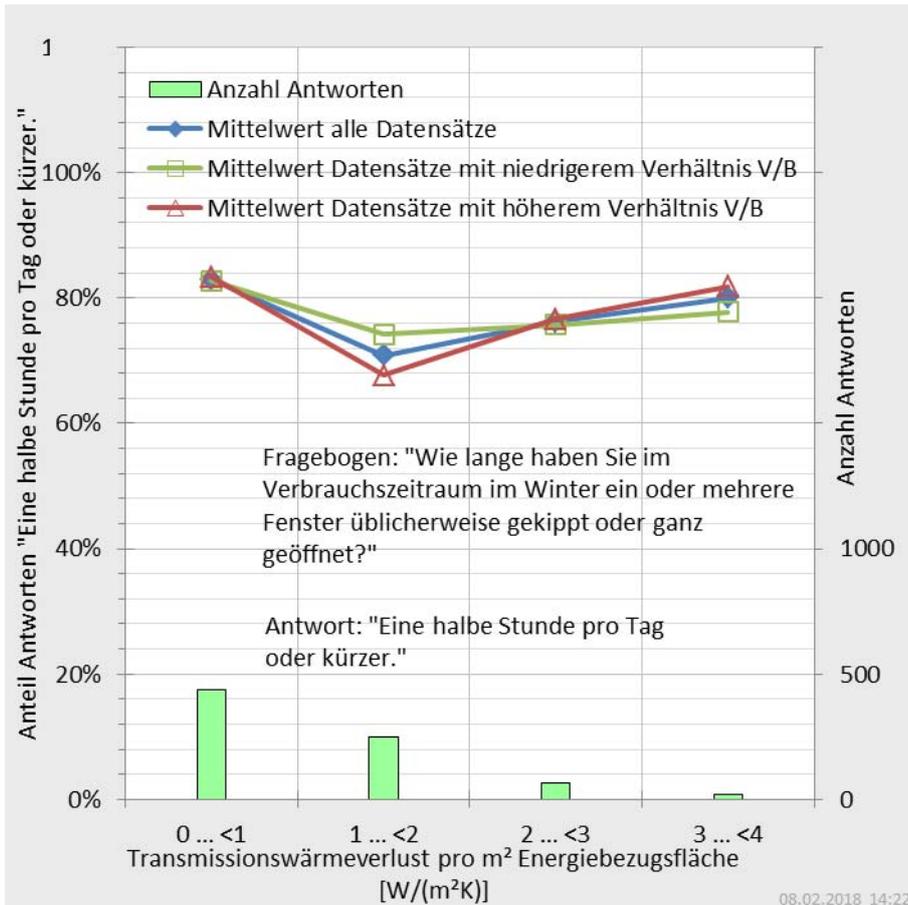


Abbildung 31:

Angaben zum Öffnen von Fenstern im Winter, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes und nach dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

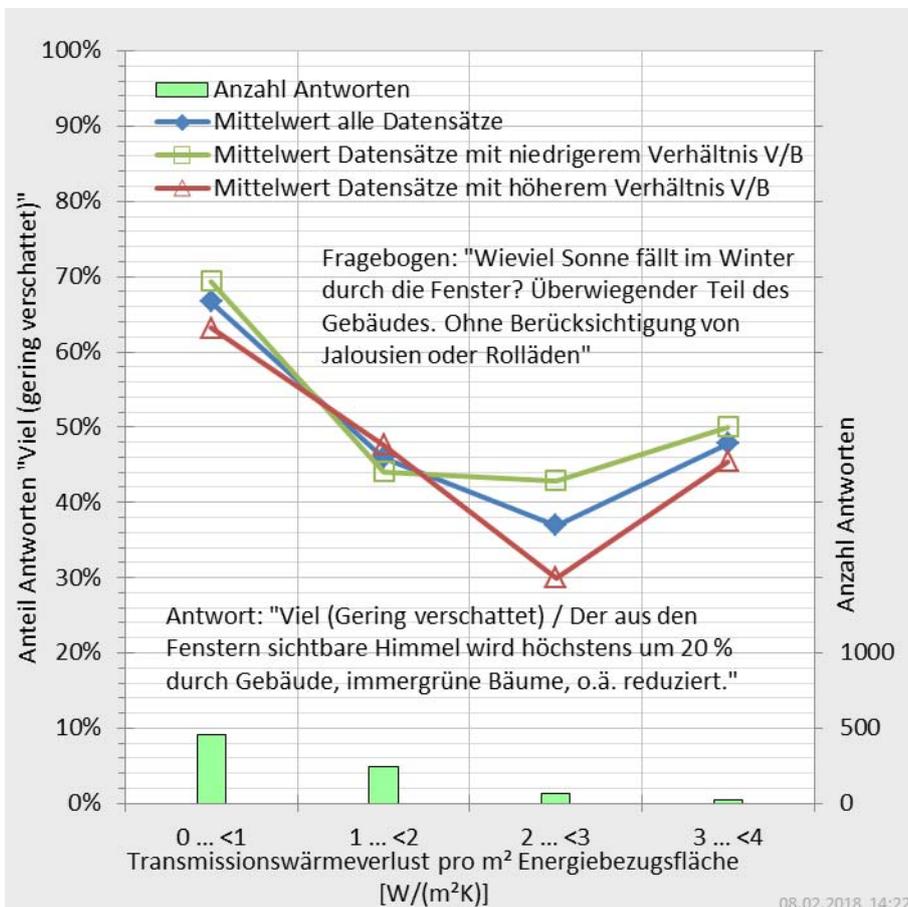


Abbildung 32:

Angaben zur Besonnung, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes und nach dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

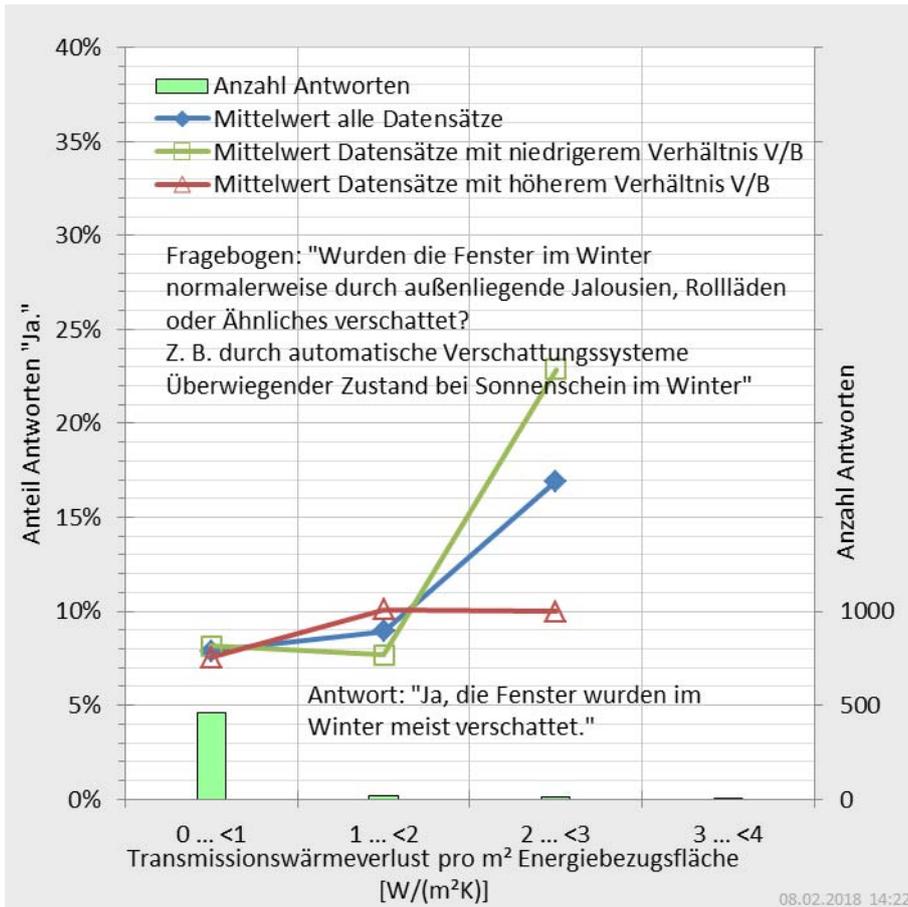


Abbildung 33:

Angaben zur Betätigung von Verschattungseinrichtungen im Winter, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes und nach dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

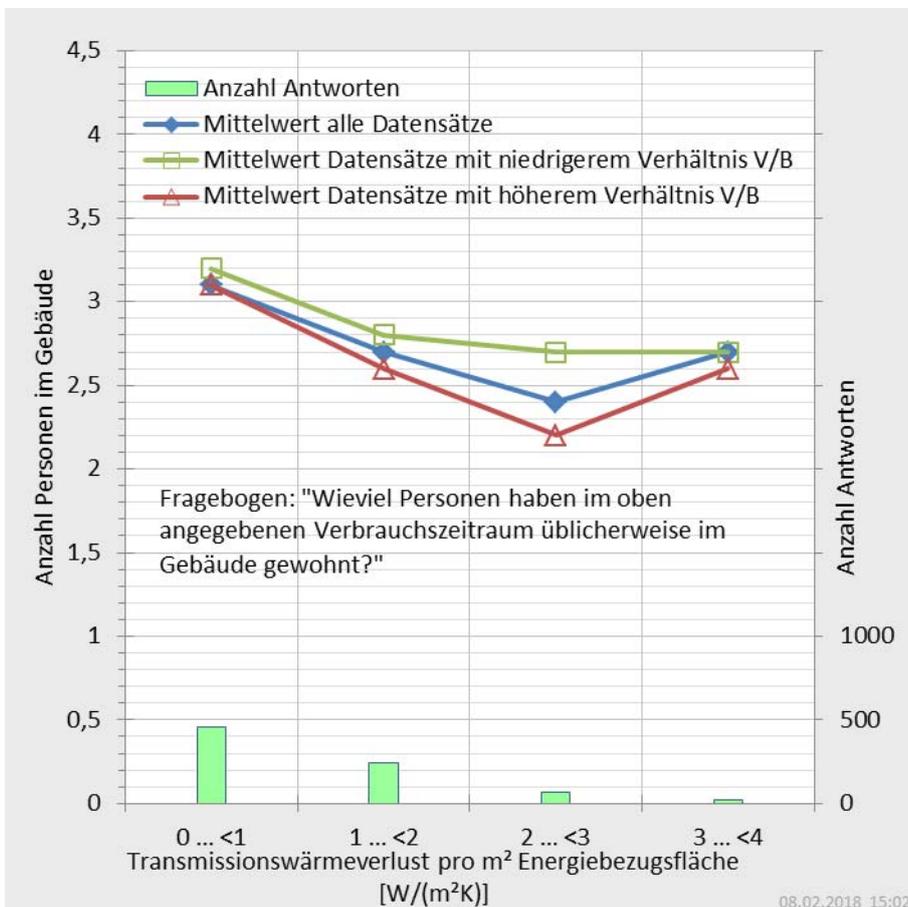


Abbildung 34:

Angaben zur Personenzahl, differenziert nach der energetischen Qualität des Gebäudes und nach dem Verbrauchs-Bedarfs-Verhältnis

## Anhang: Überblick über die verwendeten Bezugsgrößen

Im Bericht werden teils unterschiedliche Bezugsgrößen für die Gebäudefläche und den Energieinhalt von Brennstoffen verwendet. Hinsichtlich der Gebäude-Bezugsfläche wurde der folgende Ansatz gewählt:

- Die Untersuchungen zum Gebäudebestand in Kapitel 4 verwenden die Wohnfläche als Referenzgröße.
- Bei den Neubau-Analysen in Kapitel 5 wird die Gebäudenutzfläche  $A_N$  nach EnEV verwendet.
- Die übergreifende Untersuchung von Gebäudebestand und Neubau in Kapitel 6 mit dem TABULA-Verfahren verwendet die TABULA-Referenzfläche (beheizte Nettogrundfläche, abgeschätzt aus Wohnfläche plus 10 % Zuschlag).

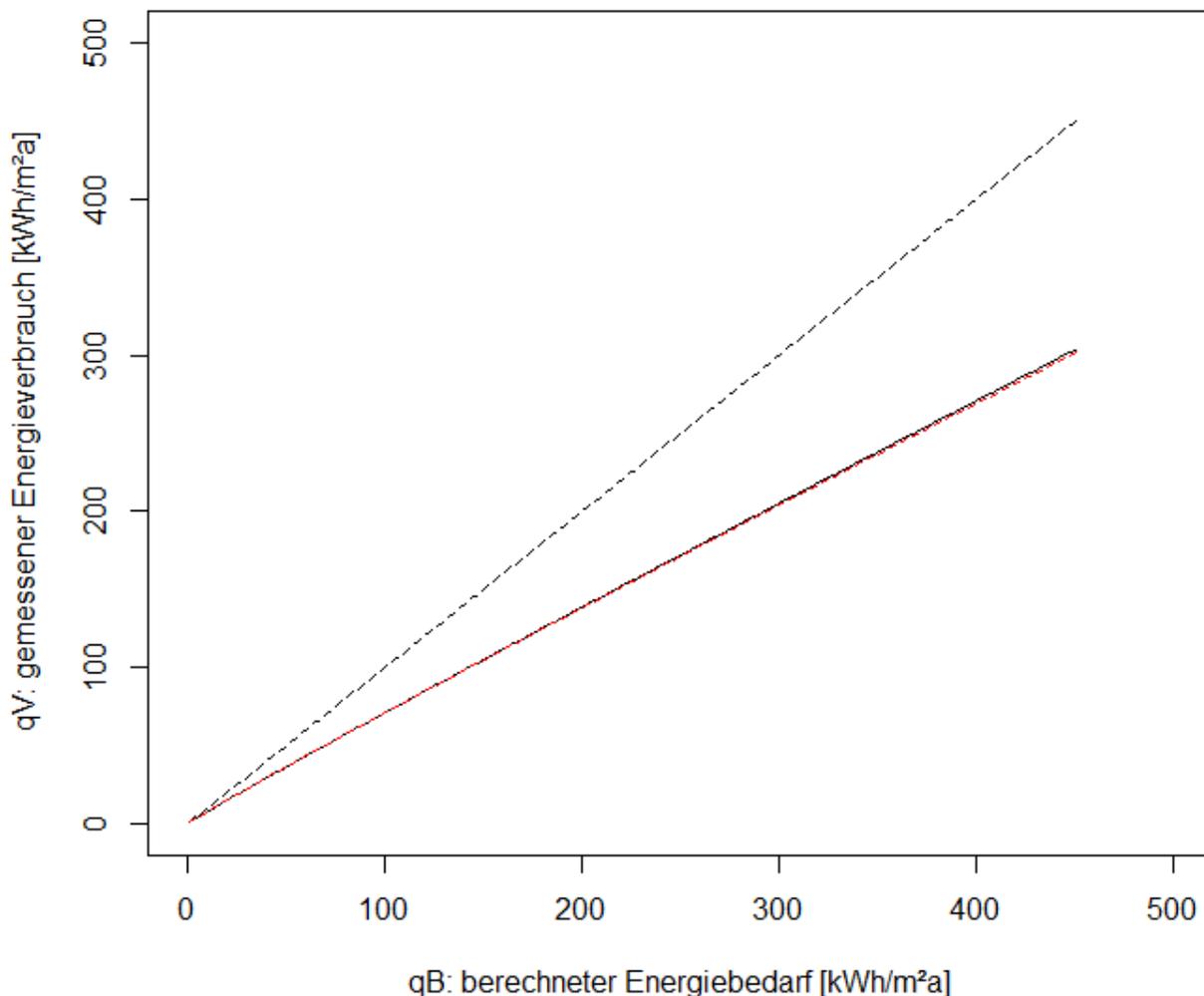
Bei Angaben zu den Brennstoffen ist Folgendes zu beachten:

- Die Angaben in Kapitel 5 zum Neubau und 4.1 mit einem Überblick über die Energieverbräuche im Bestand beziehen sich im Fall von Brennstoffen auf den (unteren) Heizwert, der auch im Rahmen der der EnEV zu Grunde liegenden DIN V 4108-6 / 4701-10 verwendet wird. Auf den Brennwert bezogene Verbrauchsangaben wurden für den Vergleich entsprechend korrigiert.
- In den internen Algorithmen der beiden Berechnungsverfahren des IWU (SEP- und TABULA-Verfahren) ist dagegen der Brennwert (oberer Heizwert) als Bezugsgröße fixiert. Aus diesem Grund wurden die Anpassungsfunktionen und alle weiteren Angaben in den entsprechenden Kapiteln auf den Brennwert bezogen (weiteres Kapitel 4 mit den Abschnitten 4.2 - 4.3 sowie Kapitel 6). Dies gilt zur Vergleichbarkeit mit dem SEP-Verfahren auch für die Auswertungen mit dem EnEV-Verfahren in Kapitel 4 (Gebäudebestand).

Der Bezug auf den Heizwert bzw. Brennwert gilt jeweils immer gleichzeitig sowohl für die Angaben zum gemessenen Energieverbrauch als auch zum berechneten Energiebedarf.

Die Anpassungsrechnungen in Kapitel Kapitel 4 (Unterkapitel 4.2 und 4.3) wurden auf Basis des Brennwertes durchgeführt. Im Folgenden wird für die wichtigsten Funktionen  $q_{B,V}$  der Übergang zum Brennwert dokumentiert.

Abbildung 35 zeigt die Kurve für die Anpassungsfunktion aus Abbildung 3 (schwarze durchgezogene Linie), die auf Basis des Brennwertes durchgeführt wurde, im Vergleich mit einer weiteren Kurve (rote gestrichelte) Linie, die das Ergebnis derselben Auswertung auf Basis des Heizwertes zeigt.



**Abbildung 35 Anpassungsfunktionen für das Energiebilanzverfahren „Energieeffizient Sanieren“ (SEP-Verfahren, Variante 2 mit 662 Gebäuden): Vergleich der Analyseergebnisse auf Basis des Heizwerts bzw. Brennwerts**

Werte bezogen auf die beheizte Wohnfläche,

schwarze gestrichelte Linie: Winkelhalbierende  $q_V = q_B$ ,

schwarze durchgezogene Linie: Anpassungsfunktion  $q_{B,V} = f(q_B)$  auf Basis des Brennwerts (identisch zu Abbildung 3 in Kap. 4.2)

rote gestrichelte Linie: Anpassungsfunktion auf Basis des Heizwerts

Unterschiede zwischen den Anpassungsfunktionen auf Basis des Brennwerts bzw. Heizwerts sind im vorliegenden Fall kaum zu erkennen: Die einzelnen Auswertungsfälle werden sowohl beim berechneten Energiebedarf als auch beim gemessenen Energiebedarf mit dem jeweils Umrechnungsfaktor (Brennwert in Heizwert) beaufschlagt, verschieben sich also in den entsprechenden Diagrammen im gleichen Verhältnis auf der x-Achse (berechneter Energiebedarf) und auf der y-Achse (gemessener Energieverbrauch). Da die Anpassungsfunktionen hier außerdem keine merkliche Krümmung aufweisen, ergibt sich der sehr ähnliche Kurvenverlauf.

Die folgende Tabelle 8 zeigt für die wichtigsten Anpassungsfunktionen aus Kap. 4 die Parameter auf Basis des Brennwerts bzw. des Heizwerts.

**Tabelle 8**      **Parameter der wichtigsten Anpassungsfunktionen  $q_{B,v}$  auf Basis des Brennwertes (wie in Kapitel 4) bzw. des Heizwertes**

| <b>Parameter der Anpassungsfunktionen aus Kap. 4: <math>q_{B,v} = \exp(c_0 + c_1 \ln(q_B))</math></b> |                           |                      |               |                          |                      |
|---|---------------------------|----------------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| mit Angabe des statistischen Standardfehlers  |                           |                      |               |                          |                      |
|   | auf Basis des Brennwertes |                      |               | auf Basis des Heizwertes |                      |
|   | $c_0$                     | $c_1$                |               | $c_0$                    | $c_1$                |
| SEP-Verfahren (662 Gebäude)   | -0,1863<br>+/- 0,1386     | 0,9660<br>+/- 0,0266 | s. Kap. 4.2   | -0,1672<br>+/- 0,1400    | 0,9617<br>+/- 0,0273 |
| Randbedingungen nach EnEV/Energieausweis  | 0,5467<br>+/- 0,1308      | 0,7929<br>+/- 0,0241 | s. Kap. 4.3.2 | 0,5860<br>+/- 0,1307     | 0,7824<br>+/- 0,0245 |
| Energiebedarf nach Energieausweis   | 0,9068<br>+/- 0,3279      | 0,7550<br>+/- 0,0683 | s. Kap. 4.3.3 | 0,9629<br>+/- 0,3259     | 0,7387<br>+/- 0,0691 |

In allen drei Fällen ist der Kurvenverlauf für die Analyse nach Brennwert bzw. Heizwert jeweils ähnlich, aber nicht völlig identisch.

## Literaturverzeichnis

- [BMWi 2017] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Mein Sanierungsfahrplan – Handbuch für Energieberater, Berlin, April 2017
- [Borg 2016] Borg, Alexander: Relationships between Measured and Calculated Energy Demand in the Norwegian Building Stock, Trondheim 2015
- [Bigalke et al. 2016] Bigalke, Uwe; Marcinek, Heike: Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude. Teil 1: Breitenanalyse; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin 2016
- [Diefenbach et al. 2018] Diefenbach, Nikolaus; Stein, Britta; Loga, Tobias; Rodenfels, Markus; Jahn, Karin; Gabriel; Jürgen: Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2016, Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt / Fraunhofer IFAM Bremen, 16.2.2018
- [Erhorn / Bergmann 2015] Erhorn, Hans; Bergmann, Antje: Energieeffizienter Neubau von Wohngebäuden - Begleitforschung und Querauswertung von Modellvorhaben (Phase 2) -- Fraunhofer IBP 2015
- [Filippidou et al. 2018] Filippidou, Faidra; Nieboer, Nico; Visscher, Henk: Effectiveness of energy renovations: a reassessment based on actual consumption savings; Energy Efficiency, March 2018 (<https://doi.org/10.1007/s12053-018-9634-8>) [Fisch et al. 2012] Fisch, Norbert; Altendorf, Lars; Kühl, Lars; Wilken, Thomas; Brandt, Edmund; Gawron, Thomas: Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden. BBSR / BMVBS-Online-Publikation 11/2012.
- [Graf 2016] Graf, Alicia: Analyse des Energieverbrauchs wärmetechnisch modernisierter Mehrfamilienhäuser - Entwicklung von Verbrauchsbenchmarks zur Beurteilung der Energieeffizienz; Master-Thesis am Institut für Massivbau / Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Darmstadt (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner), in Kooperation mit dem Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt 2016  
[http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/sonstiges/2015-12\\_AliciaGraf\\_Masterarbeit\\_TUD\\_IWU\\_EnergieverbrauchModernisierteMFH.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/sonstiges/2015-12_AliciaGraf_Masterarbeit_TUD_IWU_EnergieverbrauchModernisierteMFH.pdf)
- [Gruber et al. 2005] Gruber, Edelgard; Mannsbart, Wilhelm (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)); Erhorn, Hans; Erhorn-Kluttig, Heike (Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)); Brohmann, Bettina; Rausch, Lothar; Hünecke, Katja (Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie): Energiepass für Gebäude – Evaluation des Feldversuchs. Schlussbericht an die Deutsche Energie-Agentur; FhG ISI, Karlsruhe, 2005
- [Hörner et al. 2015] Hörner, Michael; Loga, Tobias; Cischinsky, Holger: Analyse der Energieausweis-Datenbank von Luxemburg mit den Methoden der multiplen linearen Regression und der Fehlerrechnung; Kurzbericht im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Luxemburg, 16. Juli 2015
- [Hörner et al. 2016] Hörner, Michael; Cischinsky, Holger; Lichtmeß, Markus: Analyse der Diskrepanz von Energiebedarf und -verbrauch bei Energiepässen von Wohngebäuden in Luxemburg. Teil I; Bauphysik 38 (2016). Heft 3
- [Jagnow et al. 2007] Jagnow, Kati; Wolff, Dieter: OPTIMUS – Optimal Energie Nutzen. Teil 2: Technische Optimierung und Energieeinsparung; Abschlussbericht; Studie gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU; Innung für Sanitär- und Heizungstechnik Wilhelmshaven; 2007  
<http://optimus-online.de/pdf/Endbericht%20Teil%202.pdf>  
<https://www.dbu.de/PDF-Files/A-18315.pdf>
- [Knissel et al. 2006] Knissel, Jens; Alles, Roland; Born, Rolf; Loga, Tobias; Müller, Kornelia; Stercz, Verena: Vereinfachte Ermittlung von Primärenergiekennwerten – zur Bewertung der wärmetechnischen Beschaffenheit in ökologischen Mietspie-

geln; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2006  
[http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/werkzeuge/Vereinfachte\\_Ermittlung\\_von\\_Primaerenergiekennwerten-1.0.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/Vereinfachte_Ermittlung_von_Primaerenergiekennwerten-1.0.pdf)

- [Loga et al. 2003] Loga, Tobias; Großklos, Marc; Knissel, Jens: Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung. Eine Untersuchung im Auftrag der Viterra Energy Services AG, Essen; IWU Darmstadt, Juli 2003  
[http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/neh\\_ph/IWU\\_Viterra\\_Nutzerverhalten\\_Heizkostenabrechnung.pdf](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/neh_ph/IWU_Viterra_Nutzerverhalten_Heizkostenabrechnung.pdf)
- [Loga et al.2005] Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus; Knissel, Jens; Born, Rolf: Kurzverfahren Energieprofil, Bauforschung für die Praxis Band 72, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2005
- [Loga et al. 2013] Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus: TABULA Calculation Method – Energy Use for Heating and Domestic Hot Water. Reference Calculation and Adaptation to the Typical Level of Measured Consumption; TABULA documentation; IWU, Darmstadt / Germany – January 2013  
[http://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/report/TABULA\\_CommonCalculationMethod.pdf](http://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/report/TABULA_CommonCalculationMethod.pdf)
- [Majcen 2016] Majcen, M.: Predicting energy consumption and savings in the housing stock – A performance gap analysis in the Netherlands, Delft University of Technology, 2016
- [Pehnt et al. 2015] Pehnt, Martin; Mellwig, Peter; Duscha, Markus; von Oehsen, Armany; Bormans, Thomas; Bettgenhäuser, Kjell; Diefenbach, Nikolaus; Enseling, Andreas; Großklos, Marc; Loga, Tobias; Born, Rolf; Artz, Markus: Weiterentwicklung des bestehenden Instrumentariums für den Klimaschutz im Gebäudebereich – AP 2: Elemente der Entwicklung eines gebäudeindividuellen Sanierungsfahrplans – Teil I: Methodische Vorüberlegungen. Heidelberg, Darmstadt, Köln, Bielefeld, 13.9.2015
- [PE-Lux 2007] Le gouvernement du grand-duché de Luxembourg. Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation (14.12.2007). Luxemburg: Service central de législation, 2007.
- [Schröder et al. 2009] Schröder, Franz; Greller, Martin; Hundt, Volker; Mundry, Bernhard; Papert, Olaf: Universelle Energiekennzahlen für Deutschland - Teil 1: Differenzierte Kennzahlverteilungen nach Energieträger und wärmetechnischem Sanierungsstand; Bauphysik 31 (2009), Heft 6
- [Techem 2016] Energiekennwerte 2016. Eine Studie von Techem zum Wärme- und Wasserverbrauch in Mehrfamilienhäusern; Techem Energy Services GmbH; Eschborn, November 2016  
[http://www.techem.de/ueber\\_techem/energiekennwerte.html](http://www.techem.de/ueber_techem/energiekennwerte.html)
- [Zeine et al. 2015] Zeine, Carl; Gausling, Stefan; Cassebaum, Christian; Gebhardt, Maren ; Goldau, Niclas; Peters, Judith: Energieverbrauchskennwerte energetisch hocheffizienter Gebäude „KWEFF2015“; Abschlussbericht; AGES - Gesellschaft für Energieplanung und Systemanalyse m.b.H., Munster 2015  
[https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-28343\\_01.pdf](https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-28343_01.pdf)