

Schlussbericht zum Teilprojekt E

**Energiebedarfsrechner – Berechnung wohnungsspezifischer Heizenergie
unter Berücksichtigung von Gebäude- und Verhaltenseinflüssen**

Kurztitel:

Energiebedarfsrechner (EnRe)

FKZ:

01UN1701E

Projektteam:

Bernhard Gill, Michael Schönemann, Ines Weber, Anna Wolff

München, im Mai 2018

Inhalt

Inhalt.....	2
I. Kurze Darstellung	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
II. Eingehende Darstellung.....	5
1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
AP 1: Überprüfung, Verfeinerung und Anpassung der gebäudephysikalischen Parameter	6
AP 2: Validierung des Online-Tools sowie der Verhaltensvariablen.....	9
2.1: Abgleich von Heizenergieverbrauch laut Abrechnung und Heizenergiebedarf nach Bedarfsrechner.....	10
2.2: Abgleich von Heizenergieverbrauch laut Abrechnung und Heizenergieverbrauch laut Bedarfsrechner	12
2.3: Multivariate Regression	14
AP 3: Workshop mit Experten	17
AP 4 Überarbeitung der Programmierung des Rechners.....	17
AP 5: Dissemination der Ergebnisse bei Akteuren der Wohnungswirtschaft, Energie-beratern sowie Kommunen	19
2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	19
3. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	20
4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	20
5. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	20
6. Darstellung der Veröffentlichungen	21
Literatur.....	21

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Mit dem Schwerpunkt „Bürgerenergie“ wurde dem Anschlussvorhaben eine inhaltliche Klammer gegeben. Der Fokus des Teilprojekts „Energiebedarfsrechner“ liegt auf der wohnungsgenauen Abschätzung des Heizenergiebedarfs. Dadurch bekommen Mieter und Käufer einer Wohnung spezifischere Hinweise zum Energieverbrauch einzelner Wohnungen, zudem werden Energieberatungen in ihrer Beurteilung von Heizverbräuchen unterstützt. Schließlich wird die Forschung zum Nutzerverhalten auf einer interdisziplinär durchdachte Grundlage gestellt; denn ob ein Nutzer „viel“ oder „wenig“ verbraucht, kann nur beurteilt werden, wenn man Verhaltens- und Bedarfskomponenten voneinander abgrenzen kann. Dies wurde mit einer interdisziplinären Herangehensweise mit Ingenieuren, Informatikern und Soziologen sowie einem Methodenmix aus Workshops, Experteninterviews und quantitativer Datenanalyse erreicht.

2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Der Heizenergieverbrauch einer Wohnung hängt vom bauphysikalisch bedingten Bedarf sowie vom Nutzerverhalten ab. Der bauphysikalisch bedingte Bedarf eines Hauses lässt sich über Angaben zum Grundriss, zum Baualter und zum Zustand der Heizung näherungsweise relativ einfach ermitteln. Dazu existiert bereits ein vom Institut für Wohnen und Umwelt entwickeltes Kurzverfahren (Loga u.a. 2005), das sich an verschiedenen Stellen im Internet findet und auf dessen Basis auch Bedarfsausweise ausgegeben werden können, wie sie bei Vermietung und Verkauf vorgelegt werden müssen. Allerdings sagen diese Bedarfsausweise nicht viel über den Bedarf einer einzelnen Wohnung, weil dieser in erheblichem Maße von der Lage der Wohnung abhängt: Wohnungen mit vielen Grenzflächen zu unbeheiztem Außenraum – zum Beispiel im Dachgeschoss – benötigen erheblich mehr Heizenergie als Wohnungen, die an mehreren Seiten an andere (wahrscheinlich beheizte) Wohnungen angrenzen.

Mit dem Zweck der eingehenden Analyse von Gebäude- und Verhaltenseinflüssen wurde in dem vom BMBF geförderten Projekt „Lokale Passung“ bereits ein Prototyp eines Rechners zur wohnungsspezifischen Heizenergiebedarfsberechnung entwickelt (www.lokale-passung.de/rechner), der neben der Bedarfsberechnung auch in der Lage ist, Angaben zum Verhalten der Haushalte zu berücksichtigen, um ihren Verbrauch abzuschätzen. Im Rahmen des siebenmonatigen Anschlussvorhabens sollte dieser Rechner nun intensiver validiert und in die Dissemination überführt werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der erwähnte Prototyp des Rechners (www.lokale-passung.de/rechner) sollte ausgehend von der gebäudephysikalischen Seite so weiterentwickelt werden, dass eine höhere Repräsentativität in Bezug auf unterschiedliche Gebäude- bzw. Wohnungstypen und unterschiedliche Sanierungsstandards erreicht wird. Dazu war z.B. eine Überarbeitung hinsichtlich der Abfrage des Wohnungsgrundrisses, der Deckenhöhe (insbesondere bei Dachgeschosswohnungen), der Fenster, möglichen Wärmeübertragungen

zwischen Wohnungen und ggf. auch des Heizsystems angedacht. Bisher aus Interviews deduzierte Variablen zum Verhalten sollten darüber hinaus mit einer größeren Stichprobe (N = ca. 180) tiefergehend geprüft und im Hinblick auf die (quantitative) Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch ggf. erweitert oder angepasst werden. Im Rahmen dieser Entwicklungsarbeiten sollten darüber hinaus die Bedienbarkeit und Nutzerfreundlichkeit des Online-Rechners sowie des Outputs verbessert werden. Zur Realisierung des neuen Online-Rechners wurden fünf aufeinander abgestimmte Arbeitspakete definiert (siehe unten, II.1), und zusammen mit dem *bifa Umweltinstitut GmbH* (bifa) im Unterauftrag wurde ein interdisziplinäres Team aus Ingenieuren, Informatikern und Sozialwissenschaftlern gebildet.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Heizenergiebedarf einer Wohnung ist neben dem energetischen Gebäudestandard maßgeblich von der Position im Gebäude sowie der Größe der Außenfläche abhängig. So weisen Wohnungen im Erdgeschoss, Dachgeschoss oder auch in Eckwohnungen im Vergleich zu Wohnungen im Mittelgeschoss mit wenig Außenfläche, einen erhöhten Heizenergiebedarf auf (Casties 1997; Hall & Allinson 2010).

Untersuchungen des Heizenergieverbrauchs einzelner Haushalte zeigen ferner, dass diese auch in baugleichen Häusern oder Wohnungen eine große Varianz aufweisen, ein Umstand, der sich unter anderem durch unterschiedliche Temperaturbedürfnisse, Lüftungsgewohnheiten, Thermostatverwendungen, Anwesenheitsraten usw. ergibt (Branco u. a. 2004; Galvin 2013; Haas, Auer & Biermayr 1998). Unabhängig von einer wohnungsspezifischen Bedarfsberechnung ist es deshalb ebenso wichtig, das Nutzerverhalten der Bewohner in die Berechnung in angemessener Art und Weise mit einzu beziehen. Eine derart integrative Sichtweise von wohnungsspezifischer Bedarfsbetrachtung und Verhaltenseinflüssen ist bisher unseres Wissens nach einmalig, haben sich bisher doch eher die Ingenieurwissenschaften stark auf die Bauphysik und die Sozialwissenschaften überwiegend auf die Verhaltensaspekte konzentriert.

Der Prototyp des Rechners für den wohnungsspezifischen Heizenergiebedarf wurde in Zusammenarbeit mit Ingenieuren des *bifa Umweltinstituts* entwickelt. Dieser basiert auf dem IWU-Verfahren für Gebäude (Loga u.a. 2005) und erlaubt es, den Heizenergiebedarf unter Einbezug weniger Angaben (Baujahr, Lage der Wohnung im Gebäude, Deckenhöhe, Anzahl Zimmer, Anzahl Außenwände pro Zimmer) zu berechnen. Anhand von Interviews in zwei Sanierungsgebieten in Ulm und München wurden darüber hinaus bereits Verhaltensvariablen abgeleitet und, unter Berücksichtigung der berechneten wohnungsspezifischen Bedarfswerte, deren quantitative Auswirkung auf den Heizenergieverbrauch der Haushalte untersucht (N = 70).

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Zielstellung des Projektes war laut Projektantrag die wohnungsgenaue Abschätzung des Heizenergiebedarfs, damit Mieter und Käufer einer Wohnung spezifischere Hinweise zum Energieverbrauch einzelner Wohnungen bekommen. Zudem sollten Energieberatungen in ihrer Beurteilung von Heizverbräuchen unterstützt werden und schließlich sollte die Forschung zum Nutzerverhalten auf eine interdisziplinär durchdachte Grundlage gestellt werden.

Entsprechend dieser Zielstellung wurde gemeinsam mit dem bifa Umweltinstitut ein Arbeitsprogramm mit 5 Schritten entwickelt (*Tabelle 1*).

Tabelle 1: Arbeitspakete und zentrale Ergebnisse (lt. Beantragung)

Arbeitspakete	Zentrale Ergebnisse
AP 1: Überprüfung, Verfeinerung und Anpassung der gebäudephysikalischen Parameter	Analyse von Experteninterviews mit Fachleuten des Institut Wohnen und Umwelt (IWU) in Darmstadt, von Heizkostenablese-Firmen und Hausverwaltungen. Entwicklung eines erweiterten Online-Rechners mit modifizierten gebäudephysikalischen Parametern und Verhaltensvariablen seitens der Nutzer.
AP 2: Validierung des Online-Tools sowie der Verhaltensvariablen (Pretest N = 180)	Durchführung eines Pretests des neuen Online-Rechners mit 180 Personen.
AP 3: Workshop mit Experten	Durchführung eines Workshops am bifa Umweltinstitut und am IWU Darmstadt, Expertengespräch mit Lehrstuhlmitarbeiter des Zentrums für Nachhaltiges Bauen an der TU München.
AP 4: Überarbeitung der Programmierung des Rechners	Auf Basis der Ergebnisse von AP 2 / AP 3 wurden Anpassungen am Rechner vorgenommen. Unter anderem wurde die Mindesttemperatur in einer bewohnten Wohnung von 15 auf 17 °C erhöht und die Werte der Luftwechselrate nach unten korrigiert.
AP 5: Dissemination der Ergebnisse bei Akteuren der Wohnungswirtschaft, Energieberatern sowie Kommunen	Folge-Projekte mit Stadt Zwickau bzw. Hochschule Zwickau (ZED und EffKom), Experten-Gespräche mit Vertretern der Wohnungswirtschaft (Gewofag) sowie Heizkostendienstleistern (Brunata Metrona). Wissenschaftliche Dissemination: Beiträge auf Kongressen sowie Werkstattberichte; weitere Fachartikel sind in Vorbereitung.

AP 1: Überprüfung, Verfeinerung und Anpassung der gebäudephysikalischen Parameter

Zusammen mit Ingenieuren des bifa Umweltinstituts wurden die gebäudephysikalischen Parameter für den bereits existierenden wohnungsspezifischen Heizenergiebedarfs-rechner überprüft und verfeinert. Unterstützend wurden Experteninterviews mit Fachleuten vom IWU, von Heizkostenablese-Firmen und Hausverwaltungen geführt, die uns einen erweiterten Einblick in die Zusammenhänge von Bedarf und Verbrauch in unterschiedlichen Gebäudekonstellationen gaben. Auf Basis dieses Austauschs wurde die Notwendigkeit gesehen, sowohl die relevanten Gebäudeparameter sowie die Verhaltensvariablen detaillierter als zuvor zu erfassen und mehr Raum für verschiedene Wohnungsgrundrisse, unterschiedlich tief durchgeführte Gebäudesanierungen und unterschiedliches Nutzerverhalten zu geben.

Grundsätzliche Veränderungen am Rechner

- **Bedarfsberechnung**
 - zur Berechnung der Wärmeverluste und Wärmegewinne eine zimmergenaue Abfrage: Art des Zimmers, Fläche, Außenwandlänge, Fensterfläche, Himmelsausrichtung
 - Differenzierte Erfassung einzelner Sanierungsmaßnahmen (Fenster, Fassade, Dach)
 - Entsprechend der differenzierten Erfassung der gebäudephysikalischen Parameter Implementierung von detaillierten U- und G-Werten
- **Verbrauchsberechnung**
 - Zimmergenaue Erfassung der Temperatur, Lüftungsart und -dauer
 - Dynamisches Modell: im Vergleich zur alten Bedarfsrechnerversion wurde der Verbrauch nicht mit Hilfe von verhaltensbedingten Anpassungsfaktoren auf Basis des Bedarfes errechnet. Stattdessen gehen beispielsweise die Angaben zum Lüftungsverhalten oder die Fensterfläche und -ausrichtung über die Luftwechselrate bzw. die solare Einstrahlung direkt in die Formel

In unserer früheren Version des Wärmebedarfsrechners wurden Wohnungen modellhaft als Teil der Hüllfläche des Gebäudes aufgefasst. Das Berechnungsverfahren lehnte sich sehr stark an das sogenannte IWU-Kurzverfahren an, das ebenfalls den Wärmebedarf von Gebäuden über den Ein- und Austrag von Energie über die Hüllfläche ermittelt. Bei diesen Berechnungen gingen die folgenden Außenflächen in die Betrachtungen ein:

- Außenfläche zur Umgebungsluft
- Fensterflächen nach Außen
- Boden zum Keller oder Erdreich
- Decke zum Dachboden oder zur Umgebungsluft

Modellannahmen

Zur Verbesserung des Berechnungsverfahrens gingen die folgende Annahmen in das neue Berechnungsmodell ein:

- Die Wärmeübertragung zwischen den Wohnungen einer Etage hat Einfluss auf den Energieverbrauch einer Wohnung.
- Die Wärmeübertragung zwischen den Wohnungen unterschiedlicher Etagen ist bedeutend für die Energiebilanz.
- Der Abfluss von Wärme in unbeheizte Gebäudeteile wie Flur, Keller oder Dachboden hat einen Anteil an der Energiebilanz einer Wohnung.
- Es gibt eine Geschosstemperaturverteilung in Wohnblöcken, die vereinfachend für Berechnungen herangezogen werden kann.

Die Temperaturverteilung wurde aus Messdaten (Schröder et al. 2018) zur Innenraumtemperaturverteilung in Wohnblöcken in der Heizperiode abgeleitet und auf die Normtemperatur (19,0°C) projiziert. Diese Temperaturverteilung wird für die Annahme der umgebenden Wohnungen auf die umgebenden Wohnungen (neben, über/unter der Wohnung) in der Bedarfs- und Verbrauchsrechnung angewendet

Tabelle 2: geschossweise Durchschnittstemperaturen

Obergeschoss, Dachgeschoss	18,5 °C
Mittelgeschoss	19,6 °C
Erdgeschoss, Souterrain	19,0 °C

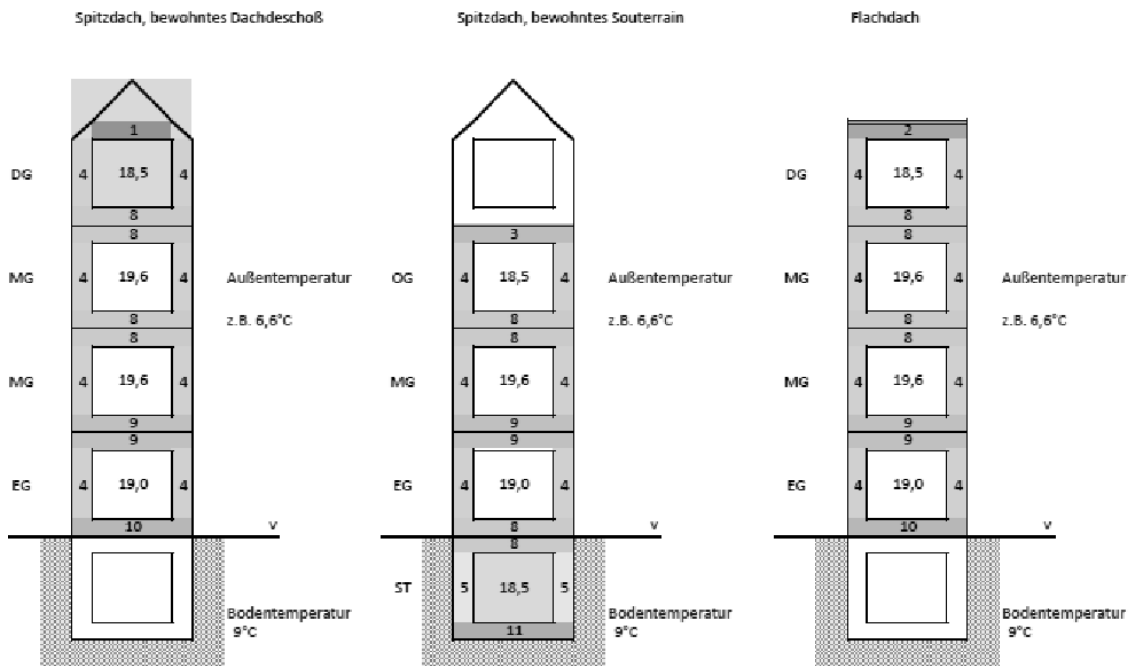
Erweiterte Grenzflächen

Dem Modell folgende Grenzflächen für die Wohnungen wurden hinzugefügt:

- Wände zu Nachbarwohnungen und/oder angebauten Nachbargebäuden
- Wände zum Flur
- Böden zu Nachbarwohnungen
- Decken zu Nachbarwohnungen

Differenzierter Katalog von U-Werten

Aus den Bauteilwerten zum Wärmedurchgang (K-Werte) und der Kombination von inneren und äußeren Wärmeübergangskoeffizienten (alpha-Werte) wurden neue U-Werte für den Wärmeverlust über innenliegende Bauteile (Decken, Böden oder Innenwände) berechnet. Dieser Wertekatalog wurde nach folgendem Schema, je nach Wohnsituation zugeteilt (Abbildung 1).



	Wärmedurchgangskoeffizient	Definition	Bauteil
1	b_Dachspitz_U	im bewohnten Dachgeschoss wohnt	
2	b_Dachflach_U	unter dem Flachdach wohnend	obere Abschlussflächen
3	b_OGDecke_U	im Obergeschoss unter dem unbeheizten Dachboden	
4	b_Aussenwand_U	Außenwände Sonderfall: bewohntes Kellergeschoss	Wände
5	Aussenwand_Kellergeschoss		
6	b_Flurwand_U	Wand zum unbeheizten Flur	
7	b_Nachbarwand_U	Wand zur beheizten Nachbarwohnung	
8	b_BD_Orauf_U	Wärmetransport durch die Decken/Böden; Richtung: rauf=Temp. unten höher wie oben runter=Temp. unten niedriger wie oben	Zwischendecken/-böden
9	b_BD_Orunter_U		
10	b_Bodenkeller_U	Boden der Wohnung über einem unbewohnten Keller	untere Abschlussböden
11	Boden_Kellergeschoss	Boden der Souterrain-Wohnung	
12	b_Fenster_U	Wärmedurchgang durch die Fenster	Fenster
13	b_Fenster_G	Gesamtenenergiedurchlassgrad für den senkrechten Strahlungseinfall	

Nr. dienen nur der Zuordnung in der Skizze (links)

Abbildung 1: Wärmedurchgangskoeffizienten nach Wohnsituation

Für diese 12-Wärmedurchgangskoeffizienten und den G-Werte der Fenster wurden zu jedem Baualter und jeder Bauphase (Bauphaseneinteilung siehe Tabelle 3) sowie im

Fälle von umfassender Sanierung Kennwerte ermittelt und zur weiteren Berechnung verwendet.

Tabelle 3: Bauphaseneinteilung

Baujahr bekannt (erbaut von bis)	Bauphase kann geschätzt werden (erbaut von bis)	umfassend saniert
bis 1918	bis 1969	saniert
1919 - 1948		
1949 - 1957		
1958 - 1968		
1969 - 1978	1970 - 1994	
1979 - 1983		
1984 - 1994		
ab 1995	ab 1995	

Mit Hilfe der neu ermittelten U-Werte, der genauen Betrachtung der Temperaturdifferenzen zwischen den Innenseiten und den Außenseiten der vollständigen Hülle einer Wohnung sollte die Bedarfsberechnung genauer werden.

Die differenziertere Berechnung der Fenster der Einzelräume sollte den solaren Wärmeeintrag genauer in die Bilanz eingehen lassen.

Durch den direkten Eingang von zimmergenau erfaßten Werten zur Raumtemperatur in der Heizperiode und der Lüftung aller Räume sollte der Nutzereinfluss plausibel in die Verbrauchsabschätzung eingehen.

AP 2: Validierung des Online-Tools sowie der Verhaltensvariablen

Mit Hilfe eines Pretests mit N = 180 Personen wurden nicht nur eventuelle Probleme bei der Nutzung des Bedarfsrechnertools erfasst, sondern auch weitere Daten für die Validierung der Bedarfs- und Verbrauchsrechnung erhoben. Die Testpersonen wurden nicht nur aufgefordert, den Online-Rechner auszufüllen und in Bezug auf Unverständlichkeiten oder Probleme in der Anwendung zu kommentieren, sondern auch ihre Heizkostenabrechnungen zur Verfügung zu stellen. Die Berechnung der tatsächlichen Verbräuche auf Grundlage der Abrechnungen sowie der Abgleich dieser Werte mit den berechneten Bedarfs- und aus den Verhaltensvariablen geschätzten Verbrauchswerten aus dem Online-Tool stellt den wesentlichen Aspekt der Validierung dar.

180 Testpersonen aus unterschiedlichen Gebieten in Deutschland nahmen über einen Zeitraum von ca. 1 Monat an dem Pretest teil und wurden für ihre Arbeit und die Zusendung der Heizkostenabrechnung mit einem Incentive belohnt. Obwohl auf die Notwendigkeit einer leserlichen und vollständigen Heizkostenabrechnung hingewiesen wurde, gab es leider einige Zusendungen, bei denen z.B. nur die erste Übersichtsseite kopiert wurde und eine differenzierte Berechnung des Wohnungsverbrauchs aus den Heizkostenabrechnungen nicht möglich war. Durch Nachfragen konnte nur ein kleiner Teil der fehlenden Informationen nachträglich erfasst werden. Nach dem Ausschluss

weiterer Fälle aufgrund von unvollständigen oder unplausiblen Angaben ergab sich eine auswertbare Fallzahl von 101.

Zunächst wurde ein Abgleich der Verbrauchs- und Bedarfsberechnung mit den tatsächlichen Heizkostenabrechnungen der befragten Personen vorgenommen. Dabei stimmt der Mittelwert der Verbrauchsberechnung des Bedarfsrechners mit dem Mittelwert der Verbrauchsberechnung anhand der Heizkostenabrechnungen relativ gut überein.

Tabelle 4: Vergleich Bedarf und Verbrauch Bedarfsrechner mit Verbrauch aus Heizkostenabrechnung für N = 101.

	Bedarf in kWh/m ² /a Bedarfsrechner	Verbrauch in kWh/m ² /a Bedarfsrechner	Verbrauch in kWh/m ² /a Heizkostenabrechnung
Mittelwert	130	114	96
Min	52	-57 ¹	16
Max	279	335	326
Std. Abw.	44	80	61

2.1: Abgleich von Heizenergieverbrauch laut Abrechnung und Heizenergiebedarf nach Bedarfsrechner

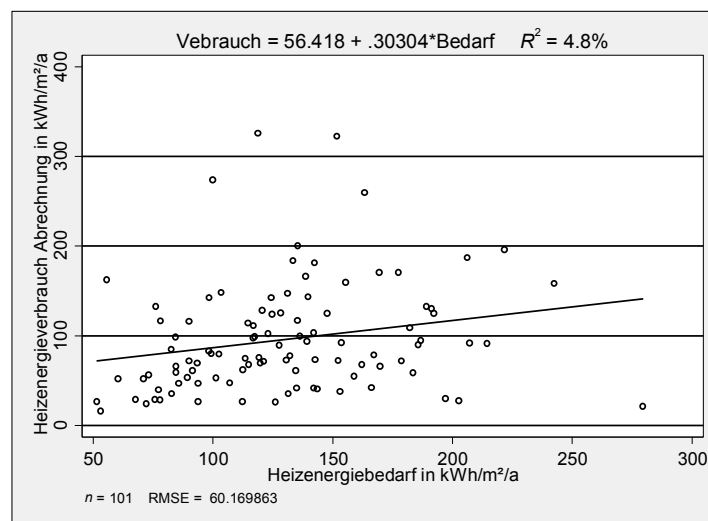


Abbildung 2: Scatterplot zum Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a nach Heizkostenabrechnung und Heizenergiebedarf in kWh/m²/a nach Bedarfsrechner

Abbildung 2 stellt einen Scatterplot mit einer linearen Regressionslinie und der zugehörigen Regressionsgleichung sowie dem Bestimmtheitsmaß R^2 dar. Entsprechend den Werten in Tabelle 4, ist durch die Punktwolke und anhand des geringen Steigungskoeffizienten für den Bedarf (0,3) gut zu erkennen, dass der Heizenergieverbrauch nach Heizkostenabrechnung im Mittel geringer als der Heizenergiebedarf ausfällt, welcher

¹ Der Bedarfsrechner schätzt negative Verbrauchswerte, wenn die solaren und internen Wärmegewinne die Wärmeverluste übersteigen – dies entspricht dann einem Passivhaus-Standard.

auf Standardannahmen basiert. Dies ist insbesondere bei höheren Heizenergiebedarfen der Fall und verweist auf das Prebound-Effektes, bei dem der tatsächliche Energieverbrauch bei älteren, energieineffizienten Gebäuden geringer als der Energiekennwert ausfällt (Sunikka-Blank and Galvin, 2012). Ferner sind die in der Literatur ebenfalls nicht unbekannt Abweichungen von Verbrauch zu Bedarf um das 2-fache zu erkennen (Galvin and Sunikka-Blank, 2013; Gram-Hanssen, 2010; Loga et al., 2011).

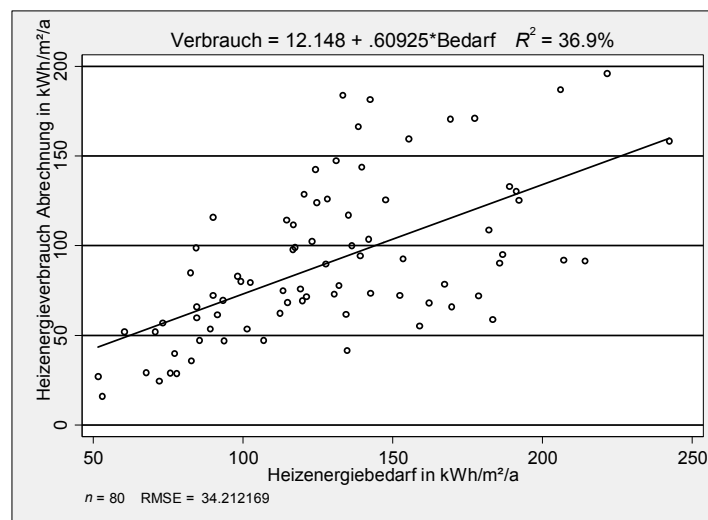


Abbildung 3: Scatterplot zum Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a nach Heizkostenabrechnung und Heizenergiebedarf in kWh/m²/a laut Bedarfsrechner nach Ausschluss von Ausreißern

Durch Ausschließen von Ausreißern² reduziert sich die Zahl auf 80 Fälle, wobei der errechnete wohnungsspezifische Heizenergiebedarf die Varianz des Heizenergieverbrauchs laut Abrechnung mit einem R^2 von knapp 37% in Abbildung 3 besser erklärt.

Durch das Logarithmieren des Verbrauchs nach Heizkostenabrechnung und des errechneten Heizenergiebedarfs verbessert sich die Modellgüte weiter und erreicht 47%. Dies wird als ausreichend gute Schätzung bewertet. Eine Modellgüte nahe 100 % ist nicht zu erwarten, da der eingangs erläuterte Unterschied zwischen errechnetem Bedarf nach Standardannahmen und tatsächlichem Verbrauch die Berücksichtigung des Bewohnerverhaltens für eine bessere Vorhersage außer Acht lässt. Im Folgenden wird deshalb der Abgleich von Heizenergieverbrauch laut den Abrechnungen mit dem geschätzten Heizenergieverbrauch durch Berücksichtigung des Bewohnerverhaltens vorgenommen. Wie eingangs skizziert, schätzt die neue Version des Rechners den Heizenergieverbrauch auf Basis der gebäudephysikalischen Parameter (Transmissionsfläche, Wärmedurchgang etc.) und dem Nutzerverhalten, insbesondere aus Angaben zum Heiz- und Lüftungsverhalten.

² Bilden des Quotienten aus Heizenergieverbrauch und Heizenergiebedarf. Ausschluss der untersten und obersten 10 Prozent.

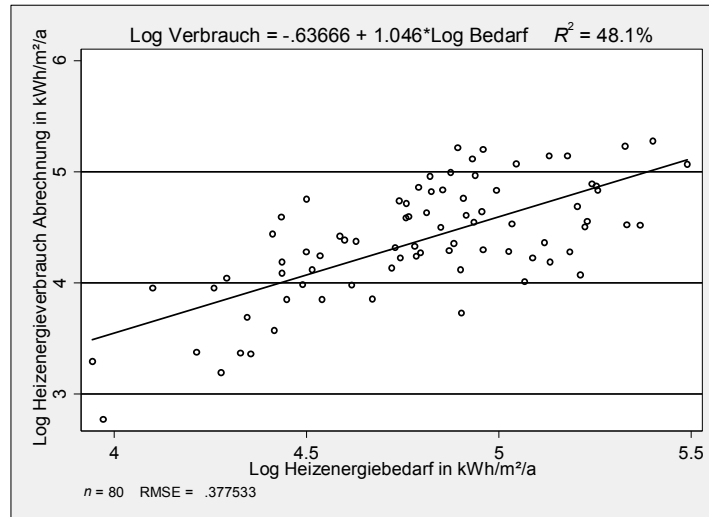


Abbildung 4: Scatterplot zum logarithmierten Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a nach Heizkostenabrechnung und logarithmiertem Heizenergiebedarf in kWh/m²/a laut Bedarfsrechner nach Ausschluss von Ausreißern

2.2: Abgleich von Heizenergieverbrauch laut Abrechnung und Heizenergieverbrauch laut Bedarfsrechner

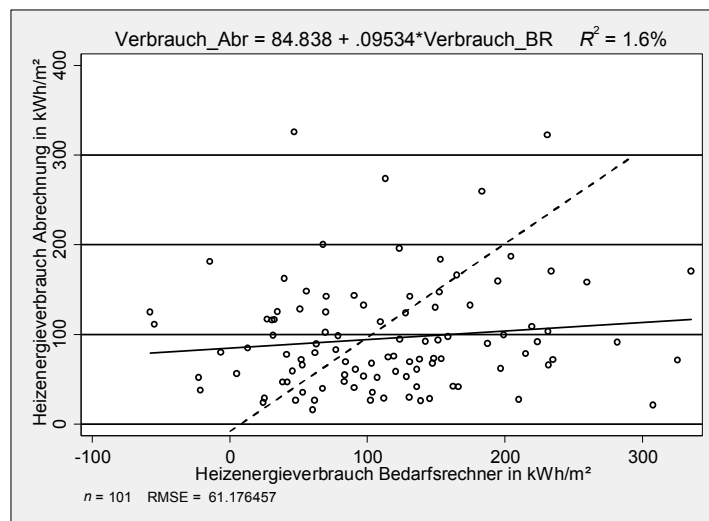


Abbildung 5: Scatterplot zum Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a nach Heizkostenabrechnung und Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a nach Bedarfsrechner

Abbildung 5 zeigt einen Scatterplot mit Heizenergieverbrauch laut Abrechnung im Vergleich mit dem durch den Bedarfsrechner geschätzten Heizenergieverbrauch. Es wird deutlich, dass die Regressionsgerade sehr flach verläuft und von der nachträglich eingezeichneten Winkelhalbierenden (gestrichelte Linie), der „Ideallinie“, entfernt liegt. Die Datenpunkte weisen darüber hinaus keinen erkennbaren Zusammenhang auf.

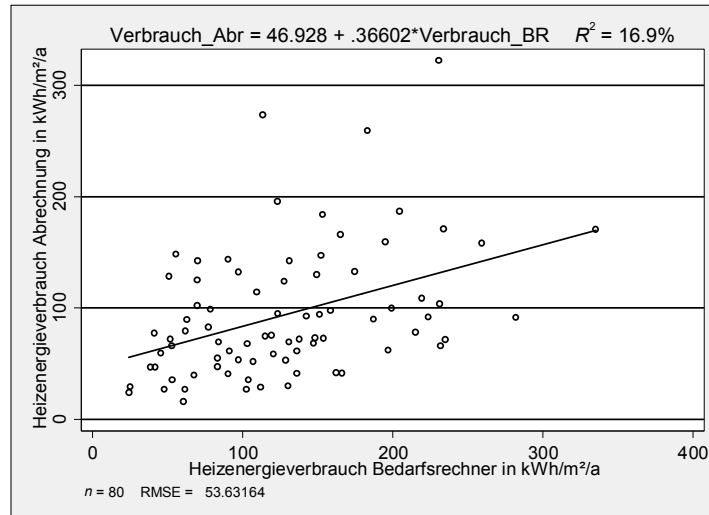


Abbildung 6: Scatterplot zum Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a nach Heizkostenabrechnung und Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a laut Bedarfsrechner nach Ausschluss von Ausreißern

Der Zusammenhang zwischen Heizenergieverbrauch nach Heizkostenabrechnung und Heizenergieverbrauch laut Bedarfsrechner erhöht sich durch den Ausschluss von Ausreißern analog zu Abbildung 3, trotzdem bleibt der Zusammenhang schwach.

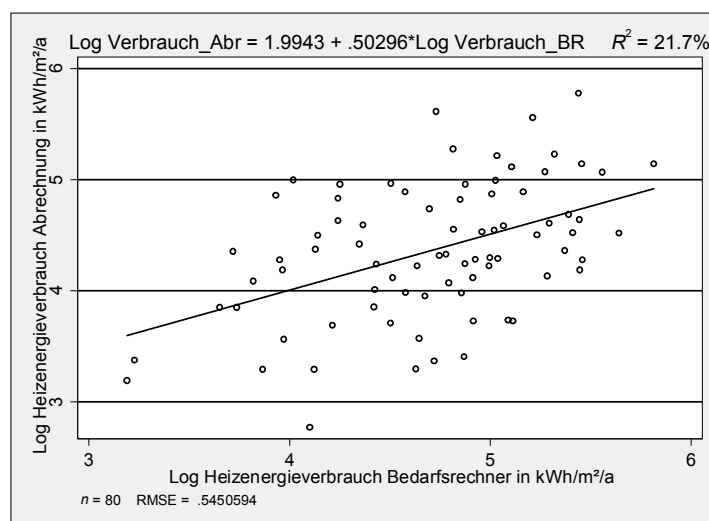


Abbildung 7: Scatterplot zum logarithmierten Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a nach Heizkostenabrechnung und logarithmiertem Heizenergieverbrauch in kWh/m²/a laut Bedarfsrechner nach Ausschluss von Ausreißern

Logarithmieren erhöht zwar auch hier die Erklärungsgüte des Modells, dennoch erklärt der geschätzte logarithmierte Verbrauch den logarithmierten Verbrauch aus den Abrechnungen entgegen der theoretischen Erwartung schlechter als der errechnete Bedarf (vgl. Abbildung 4).

Im Folgenden wird der wohnungsspezifische Verbrauch aus den Heizkostenabrechnungen in Abhängigkeit des errechneten Bedarfs und der Verhaltensparameter mittels multivariater Regressionsanalysen im Detail analysiert.

2.3: Multivariate Regression

In den nachfolgenden multivariaten Regressionen ist der wohnungsspezifische klimabereinigte Verbrauch in kWh pro Quadratmeter und Jahr laut Abrechnung die abhängige Variable. Die Variable Bedarf in kWh/m²/a stellt den anhand der Nutzereingaben errechneten wohnungsspezifischen und Heizenergiebedarf in kWh pro Quadratmeter und Jahr dar. Die Variablen Temperatur, Log Luft und Anwesenheit (nur in Tabelle 8) bilden die wichtigsten erfassten Verhaltensparameter. Die Luftwechselrate wurde aufgrund ihrer linksschiefen Verteilung im Datensatz logarithmiert.

Tabelle 5: Deskriptive Statistiken zu den Verhaltensvariablen Temperatur, Lüftung und Anwesenheit für N = 101.

	Mittelwert	Min	Max	Std. Abw.
Temperatur in °C	19,3	15	22,4	1,6
Lüftung: Luftwechselrate pro Stunde	5,6	3	29,3	3,7
Lüftung logarithmiert	1,6	1,1	3,4	0,4
Anwesenheit in Stunden pro Tag	13,5	8	24	4,5

Die einzelnen Variablen werden den Regressionsmodellen stufenweise hinzugefügt, um mögliche Interaktionseffekte zu erkennen. Die Regressionsmodelle in Tabelle 6: enthalten alle 101 Fälle.

Tabelle 6: Alle Fälle

AV: Verbrauch in kWh/m ² /a laut Abrechnung	(1)	(2)	(3)	(4)
Bedarf in kWh/m ² /a	0.303* (2.23)	0.314* (2.29)	0.323* (2.40)	0.335* (2.47)
Temperatur		3.303 (0.87)		3.509 (0.94)
Log Luft			-27.24 (-1.93)	-27.61 (-1.95)
Konstante	56.42** (3.03)	-8.917 (-0.12)	97.54*** (3.46)	28.70 (0.37)
N	101	101	101	101
adj. R ²	0.038	0.036	0.064	0.063

t statistics in parentheses

* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001

Die Koeffizienten für die Temperatur und Lüftung sind nicht signifikant. Die Koeffizienten für die Temperatur weisen in die zu erwartende Richtung: mit jedem zusätzlichen Grad Celsius erhöht sich der Heizwärmeverbrauch im Modell um 3,3 bis 3,5 kWh. Der Koeffizient für die logarithmierte Luftwechselrate ist hingegen negativ und weist damit in die nicht zu erwartende Richtung – denn eine höhere Luftwechselrate sollte zu höheren Luftwechselverlusten und damit zu höheren Heizenergieverbräuchen führen.

Tabelle 7: Alle Fälle, Verbrauch und Bedarf logarithmiert

AV: Log Verbrauch in kWh/m ² /a laut Abrechnung	(1)	(2)	(3)	(4)
Log Bedarf in kWh/m ² /a	0.553** (0.175)	0.569** (0.177)	0.592*** (0.171)	0.611*** (0.173)
Temperatur		0.0286 (0.0386)		0.0317 (0.0376)
Log Luft			-0.354 [~] (0.142)	-0.358 [~] (0.142)
_cons	1.711* (0.843)	1.079 (1.200)	2.090* (0.836)	1.394 (1.175)
N	101	101	101	101
adj. R ²	0.083	0.078	0.129	0.126

Standard errors in parentheses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Das beidseitige Logarithmieren (Verbrauchs- und Bedarfsvariable) in Tabelle 7 erhöht zwar die Erklärungskraft des Modells, die Koeffizienten für Temperatur und logarithmierter Luftwechselrate sind trotzdem nicht signifikant bzw. weisen in die entgegengesetzte Richtung. Ein ähnliches Bild zeigt sich in den Regressionen ohne die Ausreißer in Tabelle 8 – auch hier sind die Koeffizienten für das Nutzerverhalten nicht signifikant und weisen bei der Temperatur und der Lüftung negative Vorzeichen auf, was nicht der theoretischen Erwartung entspricht.

Tabelle 8: Fälle ohne Ausreißer, Verbrauch und Bedarf logarithmiert

AV: Log Verbrauch in kWh/m ² /a laut Abrechnung	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Log Bedarf in kWh/m ² /a	1.046*** (0.123)	1.030*** (0.125)	1.049*** (0.123)	1.036*** (0.125)	1.034*** (0.125)
Temperatur		-0.0248 (0.0280)		-0.0194 (0.0287)	-0.0178 (0.0288)
Log Luft			-0.115 (0.104)	-0.0999 (0.107)	-0.118 (0.109)
Anwesenheit					0.00831 (0.00950)
_cons	-0.637 (0.592)	-0.0726 (0.870)	-0.471 (0.610)	-0.0516 (0.871)	-0.160 (0.881)
N	80	80	80	80	80
adj. R ²	0.474	0.473	0.476	0.472	0.470

Standard errors in parentheses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

In Tabelle 9 ist das konzeptionell vergleichbare Modell aus dem Vorgängerprojekt „Lokale Passung“ abgebildet. Im Gegensatz zu den berichteten Modellen in den Tabellen 6 bis 8 sind alle Koeffizienten in dem Modell signifikant und weisen darüber hinaus in die zu erwartende Richtung.

Tabelle 9: Vergleich Modell aus dem Vorgängerprojekt Lokale Passung

AV: Verbrauch in kWh/m ² /a laut Abrechnung	(1)	(2)	(3)
Bedarf in kWh/m ² /a	0.987*** (22.28)	0.992*** (24.73)	0.962*** (24.30)
Temperatur	15.05*** (6.57)	13.74*** (6.55)	13.92*** (6.96)
Effizienz der Lüftung ³		-7.306*** (-4.14)	-6.839*** (-4.05)
Anwesenheit			5.872** (2.90)
Constant	-35.01*** (-4.62)	-9.329 (-1.01)	-31.50** (-2.70)
Observations	76	76	76
adj. R ²	0.873	0.896	0.906

t statistics in parentheses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Wie kommt es also dazu, dass das Modell bei der Lokalen Passung eine gute Vorhersage des wohnungsspezifischen Heizenergieverbrauchs liefert und das neue, komplexere Modell, die verhaltensbedingte Verbrauchsvarianz nicht erklären kann? Nach Auffassung des Projektteams kommen dafür mehrere Gründe in Betracht.

Eine vermutete Ursache liegt in der Komplexität der Abfrage des Rechners, welche zu einer Vielzahl von unplausiblen oder fehlenden Angaben durch die Befragten und somit zu einer starken Reduzierung der verwendbaren Fälle (N = 101) geführt hat. Dennoch sind auch bei den bereinigten Fällen die Verhaltensvariablen nicht signifikant, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass Angaben zwar plausibel erscheinen, diese aber trotzdem faktisch falsch eingetragen wurden. Im Vorgängerprojekt wurden die gebäudephysikalischen Parameter unter anderem mit Hilfe von Wohnungsgrundrissen erfasst. Darüber hinaus handelte es sich um viele Wohnungen, die sich allerdings nur auf wenige Gebäude verteilten. Im jetzigen Datensatz entstammt jede Wohnung einem unterschiedlichen Gebäude, so dass die Heterogenität bezüglich des energetischen Gebäudezustands viel größer ist.

Die Verhaltensvariablen im Vorgängermodell beruhen darüber hinaus auf durchgeführten face-to-face Interviews und wurden empirisch abgeleitet. Die Angaben der Nutzer bei der Online-Abfrage lässt mehr Raum für Missverständnisse oder Fehleinschätzungen. Diese möglichen Fehlangaben oder Fehleinschätzungen sind im Nachhinein nicht identifizierbar.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind Heizkostenabrechnungen von unterschiedlichen Messdienstleistern. Hier wurde eine sehr hohe Heterogenität der zugrundeliegenden Berechnungen festgestellt, die beim Vorgängerprojekt ebenfalls zu keinem Problem führte, da der Messdienstleister sich zwischen den Wohnungen nicht unterschied.

³ Im Vorgängerprojekt wurde die Lüftungsvariable mit „Effizienz der Lüftung“ anders definiert. Eine hohe Lüftungseffizienz geht hier mit negativen Werten einher und entspricht geringen positiven Luftwechselraten bei den Modellen in den Tabellen 6-8.

Ferner wurde insbesondere im Rahmen der Expertengespräche deutlich, dass interne Wärmeverschiebungen zwischen Wohnungen eine Problematik in der Bedarfs- und Verbrauchsschätzung darstellen, die ohne eine komplexe Messtechnik in allen Wohnungen des Gebäudes nicht näher zu bestimmen ist. Solche internen Wärmeverschiebungen treten z.B. auf, wenn es zwischen der Wohnung der Befragten und der Nachbarwohnung hohe Temperaturdifferenzen gibt.

AP 3: Workshop mit Experten

Die beiden am bifa und am IWU durchgeführten Workshops mit Experten sowie die Fachgespräche mit Vertretern der Wohnungswirtschaft und Heizkostendienstleistern dienten primär der Diskussion der unter AP 2 dargestellten Ergebnisse. Diese legten es auch aus Sicht der Teilnehmenden nahe, das ursprünglich angepeilte Ziel einer „flächendeckenden Verbreitung“ des Bedarfsrechners als online-Tool nicht weiter zu verfolgen. Dies vor allem aufgrund der Komplexität des Tools selbst und hohen Voraussetzungen, die seitens der Befragten zu leisten waren (s.o.). Stattdessen empfehlen die Experten den Rechner doch eher für Fachleute zu konzipieren und die Anforderungen dabei wieder zu „verschlanken“. Die Umsetzung dieser Empfehlung findet sich unten in AP 4.

Die Diskussion ergab aber auch, dass den internen Wärmeübertragungen zwischen den Wohnung erhöhte Aufmerksamkeit zukommen müsste. Dafür wurde ein eigenes Konzept entwickelt, das gleichfalls Eingang in die in AP 4 dargestellte neue Fassung des Rechners gefunden hat. Schließlich hat sich aus der Diskussion mit einem Teilnehmer eine interessante neue Perspektive eröffnet: Bestehende Münchener Forschungshäuser mit unterschiedlichen Technologien können im Hinblick auf die Energieverbräuche untersucht werden. Dabei wird auch die Verhaltensdimension systematisch in den Blick genommen; denn dieser wurde ein besonderer Einfluss auf interne Wärmeübertragungen zugeschrieben.

Aus diesen Gründen wurden bereits orientierende Leitfadengespräche mit den Bewohnern und Bewohnerinnen geführt. Erste Ergebnisse weisen auf systematische Zusammenhänge zwischen der Heterogenität des Heizverhaltens und (Wärme-)Verlusten bzw. Gewinnen bei den einzelnen Wohnungen hin. Diesen Befunden wird in den erst kürzlich bewilligten Forschungsprojekten ZED sowie Effkom weiter nachgegangen werden.

AP 4 Überarbeitung der Programmierung des Rechners

Auf Basis der Ergebnisse des Pretests (AP 2) und der Workshops (AP 3) wurde der Wohnungsrechner durch die bifa-Ingenieure in Abstimmung mit der LMU-Arbeitsgruppe noch einmal überarbeitet.

Wesentliche Veränderungen zum letzten Stand (vgl. AP1)

- Es wird mit Wohnfläche als Wärmebezugsfläche gerechnet.

- Es werden nur Grenzflächen mit Außenkontakt zur Außenwelt (Kellerböden, Außenwände, Fenster, Dachflächen) abgefragt und zur Transmissionsrechnung herangezogen. Falls keine Außenflächen angegeben werden können, werden die Außenflächen über Angaben zur Zimmerzahl und Außenwandzahl hochgerechnet.
- Die Fensterflächen werden mit 20% der Außenfläche abgeschätzt.
- Für beheizte Räume über oder unter Wohnungen wird der Transmissionswert halbiert. Wohnungen unter einem Satteldach erhalten das 1,25-fache der Transmissionsfläche der Wohnungsdecke.
- Für Gebäude ab 2009 sind die U-Werte aus der EnEV 2009 eingefügt.

Tabelle 10: U-Werte nach EnEV 2009

U-Werte	bis 1969	1970-1994	ab 1995	ab 2009
Dach	1,4	0,5	0,3	0,2
Außenwand	1,6	0,8	0,5	0,28
Boden	1,2	0,8	0,6	0,35
Fenster	3,6	3,2	1,9	1,3
Fenster G_Wert	0,78	0,75	0,6	0,6

- Die Luftwechselrate wird auf 0,7 festgelegt.
- Die Heizgrenztemperatur über das Verhältnis aus Wärmeaustrag und die Wärmebezugsfläche (A_{eb}) bestimmt. Die mittlere Außentemperatur und die Globalstrahlung werden entsprechend linear interpoliert.
- Der ermittelte Wärmebedarf wird dreistufig angepasst
 - Der Wärmebedarf wird relativ zur Wärmebezugsfläche angegeben
 - Für die Klimakorrektur werden die Klimafaktoren des Deutschen Wetterdienstes postleitzahlenbezogen verwendet.
 - Für die Prebound/Rebound-Korrektur in der Ausgabe wurde eine neuere Formel eingebunden (Galvin 2015: 713).

$$C = 12 * D^{0,499} - 29,3$$

C: consumption=Verbrauch

D: demand=Bedarf

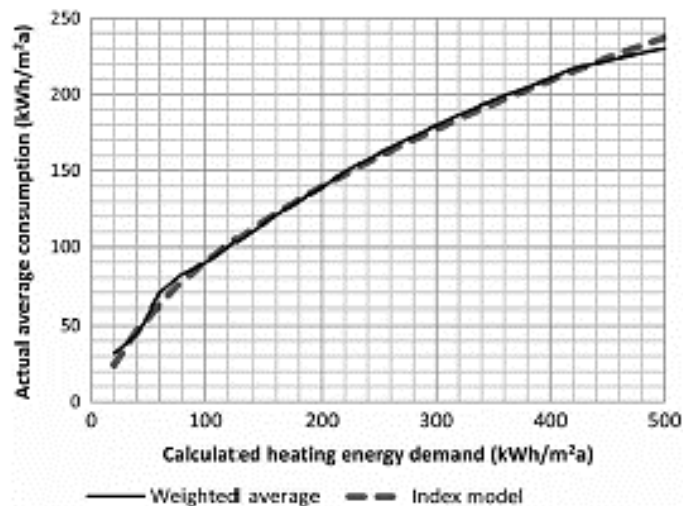


Abbildung 8: Bedarf und Verbrauch nach Galvin 2015

AP 5: Dissemination der Ergebnisse bei Akteuren der Wohnungswirtschaft, Energie-beratern sowie Kommunen

Wie bereits in AP 3 beschrieben, wurde das ursprüngliche Ziel eines Bedarfsrechners als online-Tool für Akteure aus unterschiedlichen Bereichen und insbesondere auch für private Haushalte nicht weiter zu verfolgt. Gleichwohl wurde – wie in AP 4 beschrieben – eine modifizierte Version erstellt, die interessierten Experten zur Verfügung gestellt werden kann.

Darüber hinaus konnten mit dem Projektfortschritt neue Forschungsprojekte erfolgreich aufgesetzt werden, und zwar gemeinsam mit der Stadt Zwickau bzw. der Hochschule Zwickau (ZED und EffKom). Erfolgreich war auch die wissenschaftliche Dissemination in Form von Beiträgen auf Kongressen sowie Werkstattberichten. Weitere Fachartikel sind in Vorbereitung.

2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 11: Zahlenmäßiger Nachweis der Ausgaben

Ausgaben LMU			
Position	Zweck	Summe (€)	Anteil
0812	Beschäftigte E12-E15	33.464,97	59,72%
0822	Sonstige Beschäftigte	3.218,50	5,74%
0831	Gegenstände bis 410 Euro	0,00	0%
0835	Vergabe von Aufträgen	18.200,00	32,48%
0843	sonstige Verwaltungsausgaben	800,00	1,43%
0846	Dienstreisen	350,00	0,62%
Summe		56.033,47	100,0%

3. Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Teil-Vorhaben zielte auf die Entwicklung eines „Energiebedarfsrechners“ zur wohnungsgenauen Abschätzung des Heizenergiebedarfs. Damit wurde auch die Forschung zum Nutzerverhalten auf eine interdisziplinär durchdachte Grundlage gestellt; denn ob ein Nutzer „viel“ oder „wenig“ verbraucht kann nur beurteilt werden, wenn man Verhaltens- und Bedarfskomponenten voneinander abgrenzen kann. Dies wurde mit einer interdisziplinären Herangehensweise mit Ingenieuren, Informatikern und Soziologen sowie einem Methodenmix aus Workshops, Experteninterviews und quantitativer Datenanalyse erreicht.

In Anbetracht der hier dokumentierten Ergebnisse können die Herangehensweise und die geleistete Arbeit als „angemessen und zielführend“ bezeichnet werden, und zwar sowohl in praktischer als auch in wissenschaftlicher Hinsicht. Auch wenn das Ziel, der breiten Öffentlichkeit einen wohnungsspezifischen Bedarfsrechner zur Verfügung zu stellen, aus einer Vielzahl von Gründen wie etwa interne Wärmeübertragungen oder Heterogenität und Intransparenz der Heizkostenabrechnungen nicht erreicht werden konnte, so stellen diese „constraints“ zugleich wichtige Erkenntnisse dar.

4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Neben den in AP 3 und AP 5 dargestellten Gesprächen und Workshops mit Experten lag die Ergebnisverwertung darin, den Rechner intensiver zu validieren, zu überarbeiten und in die wissenschaftliche Dissemination zu überführen.

Wie bereits beschrieben, wurde das ursprüngliche Ziel eines Bedarfsrechners als online-Tool für Akteure aus unterschiedlichen Bereichen und insbesondere auch für private Haushalte nicht weiter verfolgt. Gleichwohl wurde eine modifizierte Version entwickelt, die interessierten Experten zur Verfügung gestellt werden kann.

Darüber hinaus konnten mit dem Projektfortschritt neue Forschungsprojekte erfolgreich aufgesetzt werden, und zwar gemeinsam mit der Stadt Zwickau bzw. der Hochschule Zwickau (ZED und EffKom). Erfolgreich war auch die wissenschaftliche Dissemination in Form von Beiträgen auf Kongressen sowie Werkstattberichten. Weitere Fachartikel sind in Vorbereitung

Die Forschungsergebnisse wurden in Form von wissenschaftlichen Publikationen, Werkstattberichten und Gesprächen an die Experten aus der Praxis zurückgespiegelt sowie der interessierten Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

5. Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In der halbjährigen Projektlaufzeit ist nichts bekannt geworden.

6. Darstellung der Veröffentlichungen

- Weber I. & Gill, B. (2016): Heating demand in the residential sector: tackling the enigma of low price elasticity of homeowner's expenses. *Social Ecology*. Vol. 25 (2016.), No. 1-2, 81-101.
- Gill, B. & Moeller, S. (2018): GHG Emissions and the Rural-Urban Divide. A Carbon Footprint Analysis Based on the German Official Income and Expenditure Survey. *Ecological Economics*, Volume 145, 160-169.
- Schröder, F.; Gill, B.; Güth, M.; Teich, T.; Wolff, A.: Entwicklung saisonaler Raumtemperaturverteilungen von klassischen zu modernen Gebäudestandards –Sind Rebound-Effekte unvermeidbar? *Bauphysik* 3/2018 (im Erscheinen)
- Weber, I.; Schönemann, M.; Farny, A.; Schröder, F.; Wolff, A.; Gill, B. (2017): Explaining flat-specific heating energy consumption by building physics and behaviour. An interdisciplinary approach. LoPa Working Paper No.1, München. Abrufbar unter: www.lokale-passung.de/wp-content/uploads/2017/05/WP_calculator.pdf

Literatur

- Branco, G, B Lachal, P Gallinelli, und W Weber. 2004. Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data. *Energy and Buildings* 36 (6): 543–55.
- Casties, M. 1997. Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Nutzerverhalten und Heizenergieverbrauch, -bedarf von Wohngebäuden. Akademische Abhandlungen zu den Ingenieurwissenschaften. VWF, Verlag für Wiss. und Forschung.
- Galvin, R.. 2013. Impediments to energy-efficient ventilation of German dwellings: A case study in Aachen. *Energy and Buildings* 56. Elsevier: 32–40.
- Galvin, R. & Sunikka-Blank, M. 2013. Economic viability in thermal retrofit policies: Learning from ten years of experience in Germany. *Energy Policy* 54. Elsevier: 343–51.
- Galvin, R. 2015. Integrating the rebound effect: Accurate predictors for upgrading domestic heating. *Building Research & Information*, 43(6), 710-722
- Gram-Hanssen, K. (2010): Residential heat comfort practices: understanding users. *Building Research and Information*:175–186
- Haas, R., Auer, H.; Biernayr, P. 1998. The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating. *Energy and Buildings* 27 (2): 195–205.
- Hall, M.R. & Allinson, D. 2010. Heat and mass transport processes in building materials. *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, 3–53.
- Loga, T.; Diefenbach, N.; Knissel, J.; Born, R.. 2005. Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden.
- Sunikka-Blank, M. & Galvin, R. 2012. *Building Research and Information*: 40 (3), 260 – 273.