

WÄRMEBEDARFSSCHÄTZUNG FÜR WOHNGEBÄUDE

Sarah Schneeberger*, Edward Lucas, Curtis Meister, Philipp Schuetz

Kompetenzzentrum Thermische Energiespeicher, Hochschule Luzern, Technikumstrasse 21,
6048 Horw, +41 41 349 37 88, sarah.schneeberger@hslu.ch, hslu.ch/tes

Kurzfassung:

Angesichts der globalen Herausforderungen im Zusammenhang mit der fortschreitenden Klimaerwärmung will die Schweiz Treibhausgasemissionen reduzieren und das Netto-Null Emissionsziel bis 2050 erreichen. Diese Absicht erfordert eine drastische Umstellung auf erneuerbare Energien und eine weitreichende Elektrifizierung. Das in der vorliegenden Studie präsentierte Wärmebedarfsmodell leistet einen entscheidenden Beitrag zur effektiven Planung nachhaltiger Energiesysteme und zur Bewertung der Energieeffizienz des Gebäudebestands. Der Heizwärmebedarf von Wohngebäuden wird dabei über den Transmissionswärmeverlust in Abhängigkeit der Aussentemperatur modelliert und mittels realen Verbrauchsdaten kalibriert, was zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit geführt hat. Die Abweichung der Summe der Schätzungen vom Gesamtverbrauch aller Messungen konnte dadurch von 12.1% auf 5.9% der gemessenen Gesamtsumme reduziert werden. Da das Modell auf öffentlich zugänglichen Daten basiert, kann es schweizweit auf alle Wohngebäude angewendet werden. Eine Integration von Sanierungsdaten sowie die Berücksichtigung von Solar- und internen Wärmeeinträgen wäre eine vielversprechende Erweiterung, um die Genauigkeit des Modelles zu steigern.

Keywords: Wärmebedarfsschätzung, Transmissionswärmeverlust, Verbrauchsmessungen, Wohngebäude

1 Einleitung

Die globale Erwärmung wird durch die fortlaufende Emission von Treibhausgasen kontinuierlich verstärkt. Um die globale Erwärmung zu verlangsamen, müssen also die Emissionen reduziert werden. Diese Erkenntnis ist auch in die Klimastrategie der Schweiz eingeflossen, welche bis 2050 einen Netto-Null Emissionsziel erreichen will. Damit leistet sie einen wesentlichen Beitrag zur international vereinbarten Zielsetzung, die Erderwärmung auf höchstens 1,5°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen [1]. Die strengen Energie- und Dekarbonisierungsziele der Schweiz erfordern eine erhebliche Umstellung auf erneuerbare Energiequellen sowie weitreichende Elektrifizierung, um Integration und effiziente Nutzung dieser Technologien zu ermöglichen. Bis 2050 wird erwartet, dass die Schweiz 34 TWh/Jahr aus Photovoltaik produziert (im Jahr 2019 waren es 2.2 TWh/Jahr) und über 1,2 Millionen zusätzliche Wärmepumpen installiert (0,3 Millionen installierte Wärmepumpen im 2019). Der prognostizierte Strombedarf im Jahr 2050 wird etwa 43,5% des Gesamtenergieverbrauchs im Land ausmachen (im Jahr 2019 waren es etwa 27%) [2], [3].

Im Jahr 2022 verteilt sich der Energie-Endverbrauch in der Schweiz fast gleichmässig auf drei Verbrauchsgruppen: Haushalt (27.6%), Verkehr (36.2%) und Industrie/Dienstleistungssektor

(35%) [4]. Fokussiert auf den Wärmebedarf, wurde im Jahr 2022 in der Schweiz 28.3% des Endenergieverbrauchs zur Raumheizung verwendet. Vom gesamten Raumwärmebedarf fällt mit 66% die Mehrheit im Haushaltssektor an [5].

Kenntnisse über den gebäudespezifischen Heiz- und Kühlbedarf bilden die Grundlage für die Planung zukünftiger nachhaltiger Energiesysteme, Flexibilitätsanalysen und die Bewertung der Energieeffizienz des Gebäudebestands. Sowohl der aktuelle Bedarf als auch eine zukünftige Prognose des Bedarfs sind von Interesse, wobei der aktuelle Bedarf aus Verbrauchsmessungen abgeleitet werden kann. Allerdings werden Verbrauchswerte nicht für jedes Gebäude in der Schweiz erfasst, und selbst wenn sie erfasst werden, sind nicht immer stündliche Bedarfsprofile verfügbar. Daher sind Schätzungen des jährlichen und stündlichen Heizenergiebedarfs erforderlich.

Die meistverwendeten Ansätze, um gebäudespezifische Raumwärmebedarfe zu modellieren basieren auf physikalischen und statistischen Methoden [6]. Physikalische Modelle benötigen oft sehr viele Informationen über das Gebäude und die Umgebung, und zudem wurde in Studien nachgewiesen, dass es zu grossen Abweichungen kommt, wenn physikalische Modelle nicht mit realen Messdaten kalibriert werden [7]. Um verlässliche Resultate mit statistischen Modellen zu erhalten, sind einerseits viele Trainingsdaten notwendig, sowie genügend Eigenschaften als Modellparameter [6].

Das Ziel dieser Studie, ist die gebäudespezifische Modellierung des Raumwärmebedarfs über den gesamten Gebäudepark. Als Datengrundlage wird das öffentlich zugängliche Gebäude- und Wohnregister (GWR) [8], welches Informationen wie Bauperiode, Gebäudekategorie und Grundfläche für jedes Gebäude in der Schweiz enthält, verwendet. Mit diesen Gebäudeinformationen, Referenzwerten pro Archetypen, Wetterdaten und einem einfachen physikalischen Modell lässt sich der Bedarf jedes Gebäudes schätzen. Mithilfe von Messdaten wird das Modell kalibriert, wobei eine Klima-Regions-abhängige Kalibrierung pro Archetypen angestrebt wird. Den Fokus wird hier auf eine Region (Kanton Basel-Landschaft) gelegt.

In Kapitel 2 werden die verwendeten Daten und die Methodik genauer beschrieben. Danach folgt in Kapitel 3 die Ergebnisse, wobei in einer explorativen Datenanalyse der Fokus auf die Messdaten gelegt wird, und anschliessend auf die Modellvalidierung eingegangen wird. In Kapitel 4 wird eine Schlussfolgerung gezogen und ein Ausblick für mögliche Erweiterungen aufgezeigt.

2 Daten und Methodik

2.1 Daten

Um den Heizenergiebedarf zu modellieren, werden allgemeine Informationen zu Gebäuden aus dem GWR [8], Wärmeverbrauchsmessungen vom Kanton Basel-Landschaft sowie Wetterdaten aus der Meteostat Python-Bibliothek verwendet. Eine kurze Beschreibung der Daten und durchgeführte Bereinigungsschritte sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

2.1.1 Eidgenössische Gebäude- und Wohnregister (GWR)

Das GWR [8] ist eine umfassende Datenquelle der Gebäude in der Schweiz und enthält sowohl bestehende wie geplante, provisorische und abgerissene Gebäude. Für die Schätzung des Heizenergiebedarfs eines Wohngebäudes werden unter anderem die folgenden Attribute verwendet:

EGID, Eidgenössischer Gebäudeidentifikator: gesamtschweizerische eindeutige Identifikationsnummer für alle Gebäude

GKAT, Gebäudekategorie: Gruppierung von Gebäuden nach Verwendungszweck. Für die Schätzung von Wohngebäuden, sind nur die Gebäude mit ausschliesslicher Wohnnutzung von Interesse

GKLAS, Gebäudeklasse: Gruppierung von Gebäuden nach EUROSTAT-Klassifikation

GBAUP, Bauperiode: Gruppierung von Gebäuden nach Baujahr

GAREA, Gebäudefläche: Entspricht der Grundrissfläche [m²]

GASTW, Anzahl Geschosse: Anzahl der Stockwerke und Untergeschosse eines Gebäudes. Dachböden und Untergeschosse werden nur gezählt, wenn sie zumindest teilweise zu Wohnzwecken genutzt oder beheizt werden. Keller werden nicht gezählt.

WSTAT, Wohnungsstatus: Informationen zum Status der Wohnung

Um den Bedarf genauer schätzen zu können, wären zusätzliche Gebäudeeigenschaften, wie das Jahr der Sanierung, Sanierungsmaßnahmen, Baumaterialien, Gebäudegeometrien und die Energiebezugsfläche, nützlich. Solche Informationen werden entweder nicht im GWR geführt oder entsprechen nicht der gewünschten Qualität (oft veraltet aufgrund einer schlechten Aktualisierungsstrategie).

In den verwendeten Attributen sind Datenlücken identifiziert worden, weshalb eine Datenbereinigung erforderlich ist. Die folgenden Schritte sind durchgeführt worden:

1. Befüllen fehlender Gebäudeklassen für Wohngebäude anhand Anzahl vorhandener Wohnungen (aus "Wohnungsstatus") im Gebäude.
2. Befüllen fehlender Bauperioden durch den Wert 'vor 1919'.

Fehlende Werte der Attribute Gebäudekategorie, Grundfläche des Gebäudes und Anzahl der Stockwerke können nicht verlässlich geschätzt oder ersetzt werden, und daher werden diese Gebäude von der Analyse und der Schätzung des Heizenergiebedarfs ausgeschlossen.

2.1.2 Wärmeverbrauchsmessungen vom Kanton Basel-Landschaft

Der Heizenergieverbrauch wird aus Gasheizungsmessungen bestimmt und wurde von der statistischen Stelle des Kantons Basel-Landschaft zur Verfügung gestellt. Die Daten sind für die Jahre 2016, 2018 und 2020 bereitgestellt worden und enthalten den Wärmeverbrauch [MWh], sowie die Anzahl der Bewohnenden pro Gebäude. Folgende Verarbeitungsschritte sind zusätzlich durchgeführt worden:

1. Auswahl von Gebäuden mit Gas als Energiequelle für die Heizung.

2. Auswahl von Gebäuden, die eine Heizungsanlage für Raumheizung oder Raumheizung und Warmwasser haben.
3. Berechnung des Heizenergiebedarfs: Umrechnung des Energieverbrauchs in kWh, Multiplikation mit dem Wirkungsgrad der Heizanlage (auf 0.85 festgelegt) und Subtraktion der für die Warmwasserproduktion verwendeten Energie von der gemessenen Energie mit einem geschätzten Warmwasserbedarf von 850 kWh/(Person und Jahr) * Anzahl der Bewohnenden [9].
4. Berechnung der Heizenergiekennzahl durch Division des Heizenergiebedarfs durch die Energiebezugsfläche.
5. Auswahl von Wohngebäuden mit einer Heizenergiekennzahl zwischen 10 kWh/(m² und Jahr) und 300 kWh/(m² und Jahr). Dieser Wertebereich wurde ausgewählt, da dies typischen Werten von Wohngebäuden entsprechen.
6. Auswahl von Gebäuden, die eine Heizungsanlage haben, die nur Wärme für dieses Gebäude bereitstellt.

2.2 Methodik

Physikalisch kann der Raumwärmebedarf über den Transmissionswärmeverlust abgeschätzt werden, indem berechnet wird, welcher Wärmeverlust in Abhängigkeit von der Aussentemperatur durch Raumwärme kompensiert werden muss, um eine vordefinierte Ziel-Innentemperatur zu halten. Diese Energiebilanz kann durch eine komplexe Gleichung mit detaillierten Informationen zum Gebäude, und zu den Bewohnenden aufgestellt werden. Eingeschränkt durch die vorhandenen Informationen zu den Gebäuden, wurde dieser Ansatz vereinfacht. Genauer lässt sich durch eine vereinfachte Energiebilanzgleichung eines Gebäudes der Wärmebedarf $\dot{Q}$ durch den Transmissionswärmeverlust $H(T - T_{amb})$ und solare/interne Beiträge approximieren:

$$mc \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} - H(T - T_{amb}) + g I(t) + \dot{Q}_{Geräten} + \dot{Q}_{Personen} \quad (1)$$

Dabei gehen wir von Gleichgewichtsbedingungen ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \text{ K/s}$) aus und vernachlässigen den Beitrag von Sonneneinstrahlung ($g = 0$), Personen ($\dot{Q}_{Personen} = 0 \text{ W}$) und Geräten ($\dot{Q}_{Geräten} = 0 \text{ W}$). Es folgt

$$Q = H \int (T - T_{amb}(t)) dt, \quad (2)$$

wobei H den Transmissionswärmetransferkoeffizient, T die Ziel-Innentemperatur und $T_{amb}(t)$ die Aussentemperatur im Zeitpunkt t darstellt. Zur Berechnung des Transmissionswärmeverlustes müssen mehrere Annahmen getroffen werden, da nicht alle notwendigen Daten bekannt sind. Ein Referenzgebäude wird definiert, um die Flächen von Bauelementen des Gebäudes berechnen zu können (vergleiche Tabelle 1).

Tabelle 1: Annahmen zu den Eigenschaften des Referenzgebäudes

Eigenschaft	Annahme
Wanddicke	0.2m
Dachdicke	0.2m
Anteil der Fensterfläche	0.1
Fenster Anteil: Norden	0.1

Fenster Anteil: Osten	0.2
Fenster Anteil: Süden	0.5
Fenster Anteil: Westen	0.2
Grundfläche zu Seitenverhältnis	0.7237 [9]
Etagenhöhe	3m
Dachneigung	30°
g-Wert der Fenster	0.654
Luftaustauschwert	0.4 [9]

Unter Verwendung der Annahmen für ein Referenzgebäude sowie der im GWR angegebenen Grundfläche des Gebäudes (A_{Fo}), kann die innere und äussere Dachfläche (A_{Ri} , A_{Ro}), die innere und äussere Wandfläche (A_{Wi} , A_{Wo}), die Fensterfläche ($A_{Fenster}$) und die innere Grundfläche (A_{Fi}) für jedes Gebäude geschätzt werden. Mithilfe dieser Informationen lassen sich die Oberfläche des Gebäudes, das Luftvolumen im Inneren des Gebäudes ($V_{G,i}$) und der Durchschnitt der inneren und äusseren Flächen (A_R, A_W, A_F) berechnen.

Pongelli et al. [11] liefert die Verteilung der U-Werte des Dachs, der Wand, der Fenster, des Erdgeschosses und der Heizenergiekennzahl pro Bauperiode und Gebäudetyp (Einfamilien- und Mehrfamilienhaus) durch Angabe von Median, 25. Perzentil und das 75. Perzentil. Diese Werte werden mit der Verteilung der Heizenergiekennzahl der gemessenen Daten aus Basel-Landschaft verglichen, und entsprechend die U-Werte ausgewählt. Schließlich wurden die Transmissionswärmetransferkoeffizienten (H-Wert) für jedes Gebäude gemäß Gleichung (4) berechnet,

$$H = (A_R)U_R + (A_W - A_{Fenster})U_W + A_F U_F + A_{Fenster} U_{Fenster} + \frac{f_{Luft} V_{G,i} \rho_{Luft} c_{p,Luft}}{3600}, \quad (4)$$

wobei f_{Luft} dem Luftaustauschwert, ρ_{Luft} der Luftdichte (1.204 kg/m³), und $c_{p,Luft}$ der spezifischen Wärmekapazität der Luft entspricht (1.004 J/kg/K).

Das Integral in Gleichung (3) wird durch die Summe über die «Heizstunden» und die Verwendung stündlicher Durchschnittstemperaturen, die aus der Python-Bibliothek Meteostat extrahiert werden, approximiert. Eine Stunde wird als «Heizstunde» ausgewiesen, wenn einerseits die durchschnittliche tägliche Umgebungstemperatur, sowie die stündliche Durchschnittstemperatur kleiner als eine festgelegte Referenztemperatur ist. Je nach Bauperiode des Gebäudes wird eine unterschiedliche Referenztemperatur verwendet: für neuere Gebäude, die nach 1980 gebaut wurden, 12°C und für ältere Gebäude 15°C.

Durch die Division des Heizenergiebedarfs durch die Energiebezugsfläche (EBF) kann die Heizenergiekennzahl berechnet werden. Auch in diesem Schritt ist eine weitere Schätzung notwendig, da die EBF erst seit in Krafttreten des GWR-Merkmal-katalogs 4.1 für Neubauten im GWR gepflegt werden muss, und deshalb für bestehende Gebäude mehrheitlich fehlt [10]. Die verwendete Schätzung basiert auf einer simplen Annäherung der EBF durch die Multiplikation der Grundfläche mit den Anzahl Stockwerke. Da unbeheizte Teil der Gebäude

(wie Treppenhäuser) nicht zur EBF gehören [11], wird dieser Wert noch mit einem Faktor (0.85) multipliziert.

Finalisiert wird das Modell durch die Validierung und Kalibrierung des geschätzten Raumwärmebedarfs durch gemessene Gasverbrauchsdaten aus dem Kanton Basel-Landschaft. Wobei der Kalibrierungsfaktor pro Archetypen über die Heizenergiekennzahl [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ y})$], der durch die Energiebezugsfläche [m^2] normierte Raumwärmebedarf [kWh], bestimmt wird. Die Validierung erfolgt mittels dem 5-Fold Cross-Validation Ansatz und dem mittleren absoluten prozentualen Fehler (MAPE) als Metrik. Dabei werden die Messdaten zufällig in Fünftel geteilt, und jeweils 4/5 werden fürs Trainieren verwendet und der übriggebliebene Fünftel für die Validierung genutzt.

3 Ergebnisse

3.1 Explorative Datenanalyse

Nach der Datenaufbereitung (siehe Kapitel 2.1.2) verbleiben 42'380 Messungen von 16'106 Gebäuden im Datensatz. Über die drei gemessenen Jahre wird ein Bedarf von total 934'463.08 MWh verzeichnet. Detailliertere Angaben pro Erhebungsjahr kann in Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Total gemessene Raumwärmebedarfe nach Erhebungsjahr

Erhebungsjahr	Raumwärmebedarf [MWh]	Ø Raumwärmebedarf pro Gebäude [MWh]	Heizgradstunden
2016	367'725,487	23.18	76101
2018	324'071,042	22.05	66713
2020	242'666,551	20.53	60714

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Heizenergiekennzahl der selektierten Messungen. Wie erwartet liegen die meisten Werte zwischen 50 und 100 kWh/m^2 . Der Median der Messungen im Jahr 2016 liegt bei 87.8 kWh/m^2 , im Jahr 2018 bei 84.5 kWh/m^2 und im Jahr 2020 bei 78.8 kWh/m^2 . In Abbildung 2 wird die Verteilung der Heizenergiekennzahl nach Bauperiode dargestellt. Gebäude, die vor 1919 gebaut wurden, haben eine tiefere mediale Energiekennzahl als Gebäude, die zwischen 1919 und 1980 gebaut wurden, was einerseits auf eine höhere Sanierungsrate bei diesen Gebäuden schliessen lässt. Andererseits aber auch daran liegen könnte, dass Gebäude ohne Altersangabe in die Kategorie „vor 1919“ eingeteilt wurden. Gebäude, die nach 1980 gebaut wurden, nimmt der Median der Heizenergiekennzahl stetig ab. Dies lässt sich durch die im Verlaufe der Jahre verbesserte Dämmungstechnologie und effizientere Heizsysteme erklären.

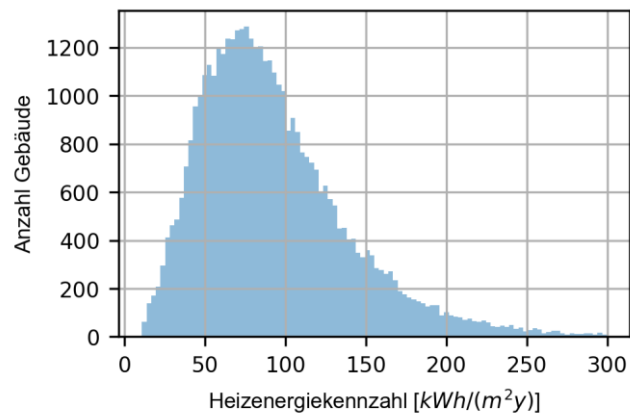


Abbildung 1: Verteilung der Heizenergiekennzahl der Gebäude im Kanton Basel-Landschaft

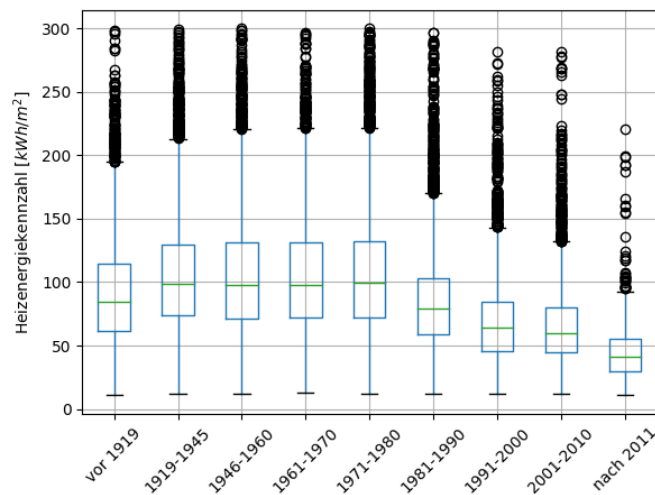


Abbildung 2: Verteilung der Heizenergiekennzahl der Gebäude im Kanton Basel-Landschaft nach Bauperiode

3.2 Validierung des Modells

Aufgrund des Vergleichs der Verteilung der Raumwärmebedarfsschätzung mit den gemessenen Daten aus dem Kanton Basel-Landschaft (Abbildung 1), kann davon ausgegangen werden, dass das Modell die Verteilung des Raumwärmebedarfs der Wohngebäude des Kantons gut abschätzt. Diese Hypothese wird gestützt durch die Betrachtung der Summe der Schätzungen, welche um 5.9% den Gesamtverbrauch aller Messungen unterschätzt. Ohne Kalibrierung mit den Messdaten, weicht die Gesamtsumme der Schätzung um 12.1% von der Gesamtsumme aller Messungen ab, wobei es sich dabei auch um eine Unterschätzung handelt. Werden die einzelnen Jahre betrachtet, wird eine Abweichung von 0.3%, 10.8%, und 7.7% der entsprechenden Gesamtsumme des spezifischen Jahres für die Jahre 2016, 2018, resp. 2020 erreicht. Wird die Kalibrierung pro Erhebungsjahr einzeln berechnet, ist im Jahr 2016 die Abweichung der Summe der Schätzungen vom Gesamtverbrauch bei 6.5%, im Jahr 2018 bei 7.0% und im Jahr 2020 bei 6.1%.

Das Streudiagramm des Heizenergiebedarfs (Abbildung 2) ist eher breit gestreut, was darauf hindeutet, dass es eine Abweichung in der gebäudespezifischen Schätzung gibt. Dies widerspiegelt sich auch im MAPE, der sich bei 38.1% beläuft. Pro Erhebungsjahr (2016, 2018, 2020) entspricht der MAPE 41.2%, 35.2%, respektive 37.6%. Bei der Kalibrierung pro Erhebungsjahr belaufen sich alle drei MAPE um 38%.

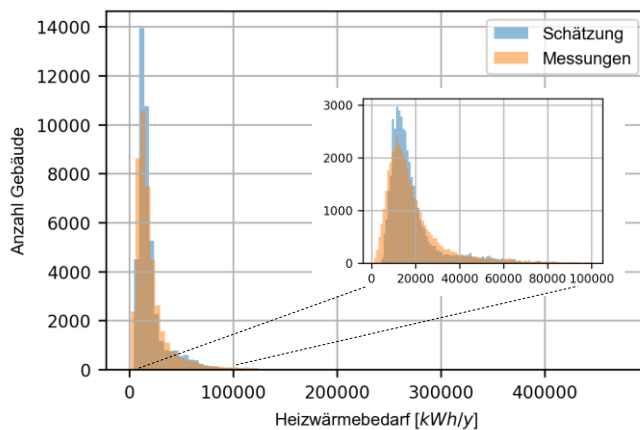


Abbildung 4: Vergleich der Verteilung der BL-korrigierten Schätzungen (über alle Erhebungsjahre) des Raumwärmeenergiebedarfs mit Messdaten. Im Zoom wurden kleinere Bins verwendet, um von der höheren Auflösung zu profitieren.

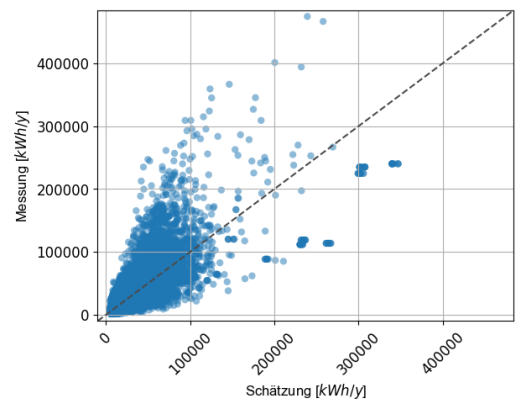


Abbildung 3: Gegenüberstellung der BL-korrigierten Schätzung (über alle Erhebungsjahre) und der Messung pro Gebäude

In Abbildung 5 sind die Verteilungen der Residuen der Heizenergiekennzahl pro Bauperiode ersichtlich. Der Interquartilsabstand, sowie die äusseren Antennen (Whiskers) sind für Gebäude, die seit 1981 gebaut worden sind, kleiner als für Gebäude, die davor gebaut wurden. Für ältere Gebäude wird angenommen, dass es eine grössere Variabilität in der Sanierung, je nachdem ob und wann diese saniert wurden, gibt. Darüber hinaus wurden Gebäude ohne Altersangabe in die Kategorie „vor 1919“ eingeteilt, was die Heterogenität erhöht. Diese Vermutung wird durch die Verteilung der gemessenen Raumwärmebedarfe bekräftigt (Abbildung 2). Da im Modell weder die Sanierungsrate noch gebäudespezifische Sanierungsmassnahmen abgebildet sind, widerspiegelt sich dies auch in der Verteilung der Residuen.

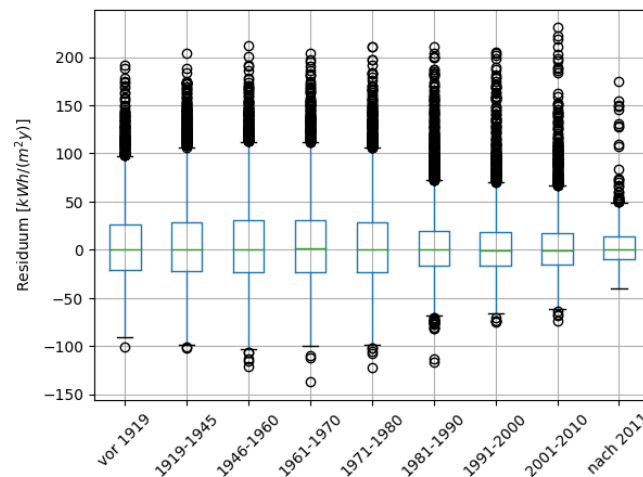


Abbildung 5: Verteilung der Residuen der BL-korrigierten Schätzungen (über alle Erhebungsjahre) pro Bauperiode

4 Fazit und Ausblick

Das präsentierte Wärmebedarfsmodell leistet einen entscheidenden Beitrag zur effektiven Wärmebedarfsschätzung, da es einerseits auf öffentlich zugänglichen Daten beruht und somit gesamtschweizerisch angewendet werden kann und andererseits, weil es den Heizenergiebedarf einer Region präzise schätzen kann: Durch die Kalibrierung mit Messdaten konnte die Abweichung von der Gesamtsumme der Bedarfsmessungen von 12.1% auf 5.8% des gemessenen Gesamtbedarfs reduziert werden. Die Zuverlässigkeit der Kalibrierung hängt stark von der Qualität der verwendeten Messdaten ab. Die Abnahme der Heizgradstunden von 2016 bis 2020, die durch Klimaberichte und Temperaturmessungen bestätigt wird [12], [13], erklärt zum Teil den Rückgang der medianen Heizenergiekennzahl und des durchschnittlichen Heizenergiebedarfs von Wohngebäuden in diesem Zeitraum [14], [15]. Auch die Verteilung der Heizenergiekennzahl nach Bauperiode verläuft der erwarteten Entwicklung, wobei neuere Gebäude tendenziell niedrigere Kennzahlen aufweisen, was auf verbesserte Baustandards und Technologien hinweist. Die Überprüfung der Messdaten bildet eine solide Grundlage und stellt sicher, dass das Modell zuverlässige Ergebnisse führt.

Das entwickelte Modell kann im Weiteren verwendet werden, um mit prognostizierten Temperaturwerten aus Klimamodellen zukünftige Heizenergiebedarfe zu berechnen. Insbesondere auch hier mit Schwerpunkt auf die Schätzung von Bedarfen für eine gesamte Region, da das Modell in der gebäudespezifischen Schätzung noch Schwächen aufweist. Dies liegt unter anderem daran, dass nur öffentlich zugängliche Daten verwendet werden, und somit detaillierte Gebäudeinformationen fehlen, um den gebäudespezifischen Bedarf genauer modellieren zu können. Was wie schon erwähnt aber auch eine Stärke ist, da dieses Modell dadurch schweizweit angewendet werden kann. Das Modell ist zudem robust bezüglich des Modellierungsjahrs. Die Schätzung weicht für alle drei Erhebungsjahre zwischen 6% und 7% von der Summe der gemessenen Bedarfe des entsprechenden Jahres ab. Auch Modellierung über alle Jahre, liefert eine ähnliche prozentuale Abweichung vom gemessenen Gesamtbedarf. Dasselbe ist für den MAPE zu beobachten. Jedoch variieren diese Werte für die jahresspezifische Validierung des Modells kalibriert über alle Daten stärker. Die

Auswertung des Jahres 2016 zeigt die tiefste prozentuale Abweichung mit 0.3% und den höchsten MAPE mit 41.2%. Gerade umgekehrt verhält sich die Auswertung des Jahres 2018, welche mit 10.8% die höchste prozentuale Abweichung und mit 35.3% den tiefsten MAPE aufweist.

Eine spannende Erweiterung des Modelles wäre die Inklusion von Sanierungsraten respektive gebäudespezifischen Sanierungsmassnahmen. Der Raumwärmebedarf ist abhängig vom Gebäudealter und weist für ältere Gebäude eine höhere Variabilität auf. Eine Vermutung dazu liegt in der Dämmungstechnologie, welche sich über die Jahre weiterentwickelt hat, und davon abhängige Sanierungsmassnahmen und -tätigkeiten. Ein Hindernis für die Inklusion von Sanierungsinformationen liegt bis anhin in der Datenverfügbarkeit und -qualität, wäre aber eine vielversprechende Möglichkeit für die Verbesserung der gebäudespezifischen Schätzung. Weitere Erweiterungen im Modell, wie die Berücksichtigung von Solar- und internen Wärmegewinnen, könnten ebenfalls die Genauigkeit des Modells verbessern. Das aktuelle Modell berücksichtigt nur den Wärmeverlust an die Umgebung, jedoch vernachlässigt den Wärmegewinn durch Sonneneinstrahlung, sowie interne Wärmequellen wie Bewohnende und Geräte (siehe Gleichung (1)).

Anstatt das kalibrierte physikalische Modell zu erweitern, könnten statistische Modelle mit den vorhandenen Messdaten trainiert werden. Dabei müsste sichergestellt werden, dass einerseits genügend Eigenschaften als Modelleingabe und entsprechend genügend grosse Menge an Trainingsdaten vorhanden wären. Interessant zu untersuchen wäre, ob es möglich ist, mit unterschiedlichen maschinellen Lernalgorithmen, von einfachen multiplen linearen Regressionen bis zu komplexen Blackbox Modellen, die Vorhersage des Heizenergiebedarfs für einzelne Gebäude in Bezug auf Bewertungskriterien wie dem mittleren prozentualen Fehler zu verbessern.

5 Danksagung

Ein Teil der in diesem Bericht veröffentlichten Forschungsarbeiten wurde mit Unterstützung des Bundesamts für Energie BFE im Rahmen der Projekte SWEET PATHFINDER und EDGE durchgeführt.

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für die Schlussfolgerungen und Ergebnisse.

6 Referenzen

- [1] "Was ist die Energiestrategie 2050?" Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050/was-ist-die-energiestrategie-2050.html>
- [2] Bundesamt für Energie BFE, "Energieperspektiven 2050+: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse," p. 36, 2021, [Online]. Available: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>
- [3] Bundesamt für Energie (BFE), "Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2021," 2021.

- [4] Bundesamt für Energie BFE, "Gesamtenergiestatistik 2022." Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html/>
- [5] Bundesamt für Energie (BFE), "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2022 nach Verwendungszwecken."
- [6] C. Deb and A. Schlueter, "Review of data-driven energy modelling techniques for building retrofit," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 110990, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.110990.
- [7] I. Staffell, S. Pfenninger, and N. Johnson, "Nature Energy nature energy A global model of hourly space heating and cooling demand at multiple spatial scales", doi: 10.1038/s41560-023-01341-5.
- [8] "GWR | Eidg. Gebäude- und Wohnungsregister." Accessed: May 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.housing-stat.ch/de/madd/index.html>
- [9] R. Dott, M. Y. Haller, J. Ruschenburg, F. Ochs, and J. Bony, "The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 Part B: Buildings and Space Heat Load A technical report of subtask C Report C1 Part B", Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <http://www.iea-shc.org/task44>
- [10] Bundesamt für Statistik BFS, "Die Neuheiten im Merkmalskatalog des eidg. GWR".
- [11] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, "SN 504380:2022 Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden." Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://viewer.snv.ch/product/843811/de>
- [12] S. Bader *et al.*, "Klimareport 2020," Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/publikationen/berichte-und-bulletins/2021/klimareport-2020.html>
- [13] S. Bader *et al.*, "Klimareport 2018," Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/publikationen/berichte-und-bulletins/2019/klimareport-2018.html>
- [14] M. Berger and J. Worlitschek, "The link between climate and thermal energy demand on national level: A case study on Switzerland," *Energy Build*, vol. 202, p. 109372, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109372.
- [15] I. Staffell, S. Pfenninger, and N. Johnson, "A global model of hourly space heating and cooling demand at multiple spatial scales," *Nature Energy* 2023 8:12, vol. 8, no. 12, pp. 1328–1344, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41560-023-01341-5.