

Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland – Methodik, Anwendung und Ausblick

Michael Hörner

Institut Wohnen und Umwelt (IWU) – Forschungsinstitut des Landes Hessen und der Stadt Darmstadt

Email: m.hoerner@iwu.de

Julian Bischof

Institut Wohnen und Umwelt (IWU) – Forschungsinstitut des Landes Hessen und der Stadt Darmstadt

Dublin Energy Lab and School of Civil and Structural Engineering, Technological University Dublin, Dublin,
Ireland

Email: j.bischof@iwu.de

Abstract

Im Gegensatz zu Wohngebäuden ist der Bestand an Nichtwohngebäuden (NWG) in Deutschland in keiner amtlichen Statistik vollständig erfasst. Das ist angesichts der wirtschaftlichen Bedeutung dieses Sektors überraschend. Und auch die zunehmende Relevanz des Klimaschutzes lässt es sinnvoll und notwendig erscheinen, den Umfang und die Charakteristika dieses wichtigen Wirtschaftsfaktors genauer und statistisch valide zu erfassen.

Die Lücke in der amtlichen Statistik konnte durch eine repräsentativen Stichprobenerhebung auf Basis der amtlichen Hausumringe Deutschland¹ geschlossen werden, ein völlig neuer Ansatz in der Statistik des deutschen Gebäudebestands (Hörner 2020). Ziel war es, erstmals statistisch valide Daten zum Bestand zur Verfügung zu stellen. Daraus ergab sich eine geschätzte Anzahl thermisch konditionierter NWG in Deutschland, die nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) relevant sind, von $\hat{N}_{GEG} = 1,981 \pm 0,152$ Millionen und eine geschätzte Bruttogeschossfläche von 3.507 ± 399 Mio. m², deutlich weniger an der Zahl, aber mit mehr Fläche als bisherige Schätzungen annehmen (BMWi 2020 S. 30).

Eine NWG-Typologie wurde aus den Erhebungsdaten entwickelt, um die Komplexität der Gebäudebestandsdaten zu reduzieren und für Szenarien handhabbar zu machen. Die große Vielfalt der NWG wurde auf 33 Gebäudetypen reduziert, die nach 11 Gebäudefunktionen und 3 Baualterklassen unterschieden wurden. Das wichtigste Merkmal der Definition der Gebäudetypen ist das Konzept der "synthetischen mittleren Gebäude", deren Variablenausprägungen "Mittelwertschätzer" der Stichprobengebäude in der jeweiligen Klasse im Sinne der Schätztheorie sind. Sie umfasst bisher U-Werte und Flächen der Hüllenteile, Erzeugeraufwandzahlen der haustechnischen Anlagen und absolute Häufigkeiten der Gebäudetypen. Aus Geodaten der Stichprobengebäude wurden die Flächen der Bauteile der Gebäudehüllen (z.B. Fassaden, Dächer und Bodenplatten) ermittelt. Die Befragungen lieferten die Monitoringvariablen zum Ist-Zustand der Gebäude zum Zeitpunkt der Erhebung wie Fensterflächenanteile und Dachtypen sowie Dämmstärken und die aktuelle Ausstattung mit technischen Anlagen. Aus diesen Monitoringvariablen wurden Modelleingangsvariablen für energetische Gebäudesimulationen (z.B. U-Werte von Bauteilen und Energieaufwandzahlen der Wärmeerzeuger) abgeleitet. Dabei fließen teilweise auch Annahmen zu altersspezifischen Eigenschaften von Gebäuden im ursprünglichen Zustand zum Zeitpunkt der Errichtung ein, ähnlich dem Ansatz im Projekt TABULA für Wohngebäude (Loga et al. 2012).

Die hier vorgestellte NWG-Typologie wurde dazu verwendet, um den Energiebedarf von Gebäudebeständen in der Nutzungsphase im Projekt FlexGeber² zu berechnen und Flexibilitätsoptionen im Gebäudesektor und deren Integration in das Energiesystem in Deutschland zu untersuchen. Sie kann auch für andere Szenarioanalysen genutzt werden. Darüber hinaus können anspruchsvollere Gebäudebestandsmodelle mit typologiebasierten Berechnungen in einer Tabellenkalkulation oder Plausibilitätsprüfungen validiert werden.

Bisher wurde der aktuelle Zustand des Nichtwohngebäudebestandes in Deutschland einer Typologie zugeordnet. Zukünftige Analysen sollen strukturelle Maßnahmen zur energetischen Modernisierung und Berechnung des Energiebedarfs hinzufügen.

¹ Erhältlich bei der "Zentralstelle für Hauskoordinaten und Hausumringe" (ZSHH), <https://www.adv-online.de/Adv-Produkte/Liegenschaftskataster/Amtliche-Hauskoordinaten/>

² FlexGeber – siehe Acknowledgements

Relevanz

Die Herausforderung des Klimaschutzes im Gebäudebestand

Die globale Klimakrise, wie sie sich zum Beispiel in den schweren Überschwemmungen in Westeuropa im Jahr 2021 (WWA 2021), der sibirischen Hitzewelle 2020 mit überwinternden Bränden (Scholten et al. 2021) und der Hitzewelle der pazifischen Nordwestküste Nordamerikas im Jahr 2021 (Philip et al. 2021) manifestiert, zeigt deutlich die Notwendigkeit eines globalen Übergangs in ein postfossiles Zeitalter. Gebäude tragen erheblich zum Energieverbrauch und zu Treibhausgasemissionen bei. Der Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht 17 % bzw. 10 % aller energiebedingten THG-Emissionen weltweit (UNEP et al. 2021). Unter Berücksichtigung der indirekten grauen Emissionen ist der globale Gebäudebestand (GB) für 37 % der weltweiten energiebedingten THG-Emissionen verantwortlich.(UNEP et al. 2021).

In Europa ist der GB für 36 % der territorialen THG-Emissionen verantwortlich (Brögger, Wittchen 2018; Tuominen et al. 2014). In Deutschland machten die Nichtwohn- und Wohngebäudebestände 2010 14,2 % bzw. 27,4 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus (IEA-BEEP 2019). Die Energiewende im Gebäudebestand spielt daher in vielen Klimaschutzstrategien eine wichtige Rolle³. Für den Klimaschutz ist entscheidend, wie schnell und tiefgreifend die bestehenden Gebäude energetisch modernisiert werden können, durch Maßnahmen, die den Endenergieverbrauch senken⁴, und durch die Dekarbonisierung der Energieversorgung. Gleichzeitig müssen die materialbedingten Emissionen minimiert werden.

Das wegweisende Urteil des Bundesverfassungsgerichts über die Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels in der Zukunft (BVerfG 2021) hat die Bundesregierung veranlasst, das Klimaschutzgesetz (KSG) zu novellieren und die Netto-THG-Neutralität als nationales Klimaschutzziel für alle Sektoren einschließlich des Gebäudesektors bereits im Jahr 2045 zu setzen. (BReg 2021)

Modellierung des Gebäudebestands mit Gebäudetypologien

Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen, sind zuverlässige Informationen über den GB, idealerweise mit Angabe der Unsicherheiten, notwendig, um den Zustand des Bestands zu kennen, seine Dynamik zu verstehen und die emissionsärmsten, energie- und kosteneffizientesten Dekarbonisierungspfade durch Szenarioanalysen zu identifizieren. Gebäudetypologien sind eine etablierte Form der Modellierung von lokalen, regionalen und nationalen Gebäudebeständen. Sie sind flexibel und können um verschiedene Datenquellen erweitert werden, etwa um neben THG-Emissionen in der Nutzungsphase auch die materialbedingten Emissionen abzubilden (Bischof, Duffy 2022; Mastrucci et al. 2017; Reinhart, Cerezo Davila 2016).

Wir unterscheiden im Wesentlichen zwei Hauptanwendungsbereiche von Gebäudetypologien: Es gibt erstens Typologien, die mit realen Beispielgebäuden für den Einsatz in der Energieberatung arbeiten. Anhand von Fallstudien der Beispielgebäude können Berater beispielsweise die Wirkung energieeffizienter Modernisierungsmaßnahmen veranschaulichen, ohne zuvor eine umfangreiche Datenerhebung an einem bestimmten Objekt durchführen zu müssen. Und zweitens werden Gebäudetypologien als Eingabedaten für die Modellierung (am häufigsten des Gebäudeenergieverbrauchs) von Gebäudebeständen verwendet. Ein solcher Ansatz wurde beispielsweise von (García Kerdan et al. 2015) verfolgt.

Im Allgemeinen werden Typologien in einem Klassifizierungsprozess entwickelt, wobei Proxy-Variablen verwendet werden, die mit dem Zielwert der Typologie korrelieren, um den Gebäudebestand in eine begrenzte Anzahl von Teilbeständen zu unterteilen (Kluge 2000). Diese Teilbestände werden jeweils durch einen sogenannten Archetyp oder Gebäudetyp repräsentiert (weiterhin wird nur der Begriff Gebäudetyp verwendet). Ein Beispiel für einen Gebäudetyp ist ein "Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude" in der Altersklasse "Neubauten (errichtet ab 2010)". Die Menge aller Gebäudetypen stellt die Gebäudetypologie dar. Ein gemeinsames Ziel einer

³ Die Sektoren werden im deutschen Klimaschutzgesetz (KSG) nach den Quellenkategorien des Common Reporting Format (CRF) der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) und der entsprechenden europäischen Durchführungsrechtsakte (derzeit Durchführungsverordnung EU Nr. 749/2014) oder nach einer Nachfolgeverordnung definiert, die auf der Grundlage von Artikel 26 Absatz 7 der Europäischen Governance-Verordnung (CPA) erlassen wurde. Anhang 1). Zu den Quellenkategorien im Bausektor gehören die Verbrennung von Brennstoffen in Haushalten, Gewerbe und Behörden sowie andere Tätigkeiten im Zusammenhang mit der **Verbrennung von Brennstoffen** (insbesondere in militärischen Anlagen). In Anhang 2 der CPA sind die zulässigen jährlichen Emissionsmengen aufgeführt.(BReg 2021 S. 19)

⁴ Im 2. Fortschrittsbericht zur Energiewende, Die Energie der Zukunft, Berichtsjahr 2017, wird der Endenergieverbrauch in Gebäuden als Wärmebedarf bezeichnet. Dieser "gebäuderelevante Endenergieverbrauch" macht 34,5 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus und berücksichtigt private Haushalte, Handels- und Dienstleistungssektoren (GHD) und Industrie. "Der gebäuderelevante Endenergieverbrauch für Wärme (Wärmebedarf) ist der Verbrauchswert für Raumheizung (Heizung), Raumkühlung und Warmwasserbereitung. Darüber hinaus wird in Nichtwohngebäuden der Stromverbrauch für die (fest installierte) Beleuchtung berücksichtigt."(BMWi 2019 S. 105)

Typologieentwicklung ist die Reduzierung der Diversität der Grundgesamtheit, dabei ist zwischen einer detaillierten Betrachtung aller möglichen Kombinationen relevanter Proxyvariablenwerte und der möglichst geringen Gesamtanzahl von Gebäudetypen abzuwägen (Buschka et al. 2021).

Viele Typologien für Gebäudebestände wurden bereits entwickelt, für Wohngebäude (Eicke-Hennig, Siepe 1997; Famuyibo et al. 2012; Filogamo et al. 2014; Klauß et al. 2009, 2010; Loga et al. 2015, 2016; Ortlepp et al. 2016) und für Nichtwohngebäude gleichermaßen (BMVBS 2011; Deilmann et al. 2013; García Kerdan et al. 2015; Gierga, Erhorn 1993; Hjortling et al. 2017; Klauß et al. 2010; Kretschmar et al. 2019; Mittner 1992; Stein, Hörner 2015; TABULA Project Team 2012).

Forschungslücke und -ziele

Es konnte jedoch kein Ansatz für eine Nichtwohngebäudetypologie auf der Grundlage eines statistisch validen Datenbestands identifiziert werden, weder als Vollerhebung noch als repräsentative Stichprobenerhebung. Keine der oben genannten Typologien ist im statistischen Sinne repräsentativ. Dieser Artikel beschreibt daher, wie im Projekt FlexGeber aus den nun vorliegenden statistisch repräsentativen Daten des deutschen Nichtwohngebäudebestandes eine entsprechende Typologie entwickelt wurde, mit synthetischen Gebäuden als Gebäudetypen, deren Variablenausprägungen den aus der Stichprobe hochgerechneten mittleren Werten der Grundgesamtheit entsprechen und die dadurch bedingten Standardfehler quantifizieren.

Der Datensatz

Das oben genannte Forschungsziel kann nur mit einem geeigneten Datensatz erreicht werden. Im Projekt ENOB:dataNWG⁵ wurden erstmals in einer Stichprobenerhebung statistisch repräsentative Daten des deutschen Nichtwohngebäudebestandes erhoben (Hörner 2020). Aufgrund des fehlenden Gebäuderegisters dienen die amtlichen Hausumringe Deutschland (HU-DE), die auf dem Liegenschaftskataster in Deutschland beruhen, als Auswahlgrundlage. In einem Vor-Ort-Screening im Anschluss an die Stichprobenziehung wurden die Relevanz der Hausumringe für die Erhebung bewertet und fehlende Daten, wie z.B. Hinweise auf die Eigentümer, hinzugefügt.

In der Befragung wurden Primärdaten zu grundlegenden Eigenschaften (z. B. Gebäudefunktion, Baujahr usw.), der Zustand und die Dynamik der energetischen Qualität (z. B. Dicke der Wärmedämmung, Prozentsatz der bereits isolierten Gebäudehüllenfläche usw.) und die Entscheidungsprozesse bei Modernisierung ermittelt. Die Daten wurden über einen umfangreichen Fragebogen in Online- oder computergestützten Telefoninterviews erhoben. Darüber hinaus wurden die offiziellen 3D-Gebäudemodelle Deutschland in Level of Detail 1⁶, die deutschlandweit verfügbar sind, verwendet, um geometrische Eigenschaften aller NRBS in der Stichprobe zu berechnen, wie z.B. Umfang, Hüllflächen nach Haupthimmelsrichtungen und Volumen.

Die Stichprobe des Projekts ENOB:dataNWG wurde so konzipiert, dass "Repräsentativität"⁷ erreicht wurde. Im Sinne der Stichprobentheorie bedeutet dies, dass die unverzerrte Schätzung⁸ der wahren Werte der Parameter der (Ziel-)Grundgesamtheit aus der Stichprobe möglich ist. Infolgedessen können die Variablenwerte der durchschnittlichen Gebäude unverzerrt als Mittelwerte der Variablen der Stichprobengebäude geschätzt werden. Die damit verbundene Stichprobenunsicherheit ist quantifizierbar und war durch die geeignete Auswahl des Stichprobenumfangs (100.000 HUs) für die Projektziele akzeptabel gering. Das Stichprobenmodell des Projekts ENOB:dataNWG ist ausführlich beschrieben in (Cischinsky 2021).

⁵ ENOB:dataNWG – siehe Acknowledgements

⁶ Erhältlich bei der "Zentralstelle für Hauskoordinaten und Hausumringe" (ZSHH), <https://www.adv-online.de/ADV-Produkte/Weitere-Produkte/3D-Gebaedemodelle-LoD/>

⁷ Der Begriff "Repräsentativität" ist ein umgangssprachlicher Begriff, der in der Stichprobentheorie nicht definiert ist; er ist daher hier in Anführungszeichen gesetzt. Die unverzerrte Schätzung der Parameter der Grundgesamtheit aus einer Stichprobe ist möglich, wenn drei Bedingungen erfüllt sind:

1. Die Stichprobenziehung muss rein zufällig sein.
2. Die Ziehungswahrscheinlichkeiten der in die Stichprobe einbezogenen Nichtwohngebäude müssen bekannt sein (sie müssen jedoch nicht identisch sein) und bei der Schätzung angemessen berücksichtigt werden.
3. Jedes Nichtwohngebäude muss eine Chance haben, in die Stichprobe aufgenommen zu werden, d.h. es muss eine positive Ziehungswahrscheinlichkeit haben.

⁸ In der Stichproben- und Schätztheorie wird die ungefähre Bestimmung der Verteilung oder der Parameter der Grundgesamtheit auf der Grundlage von Stichproben als "Schätzung" und die Regel für die Schätzung als "Schätzmethode" bezeichnet. Ein Schätzer ist unverzerrt, wenn die Differenz zwischen dem Erwartungswert dieses Schätzers und dem wahren Wert des Parameters gleich Null ist.

Methodik

Die Typologie wird nach dem in Abbildung 1 dargestellten Schema entwickelt. Zunächst wird der Zweck der Typologie, die Zielgröße, definiert, in diesem Fall der Gebäudeenergiebedarf. Dann sind die relevanten Gebäude- und Nutzungsmerkmale (z. B. die thermischen Eigenschaften der Hülle), die sich auf die Zielgröße auswirken, zu identifizieren. In einem nächsten Schritt werden Proxyvariablen mit Bezug zu diesen Gebäude- und Nutzungsmerkmalen ermittelt, um eine Klassifizierung vorzubereiten. Im Allgemeinen sind die Ausprägungen der Proxy-Variablen in der Datenbank zu klassifizieren, um die Vielfalt der Grundgesamtheit mit einer Mindestanzahl von Klassen, den Gebäudetypen, darzustellen. In der Datenbank von ENOB:dataNWG sind die Proxyvariablen der Wahl, die Gebäudefunktion und die Baualtersklasse, bereits nominal skaliert, ihre Merkmalsausprägungen werden als Klassenkennungen übernommen. Für diese Gebäudetypen werden die Mittelwerte relevanter Gebäudemerkmalen der Grundgesamtheit aus der repräsentativen Stichprobe von ENOB:dataNWG geschätzt. Diese Schritte zur Entwicklung einer Nichtwohngebäudetypologie werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

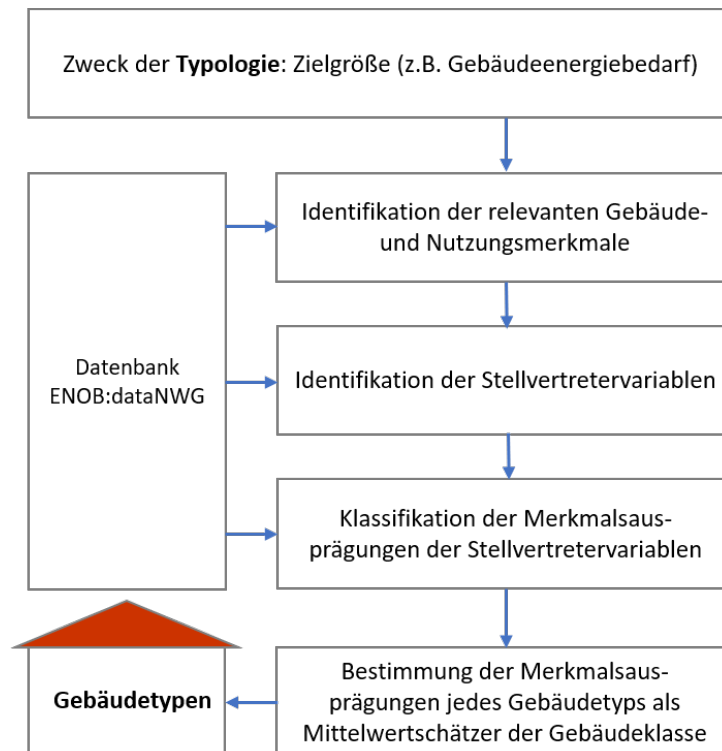


Abbildung 1: Entwicklungsmethodik für eine Gebäudetypologie

Entwicklung der Gebäudetypologie

Zweck der Typologie: Zielgröße Gebäudeenergiebedarf

Das Ziel der hier dargestellten Typologieentwicklung bestand darin, Archetypen für die vereinfachte Modellierung des Gebäudeenergiebedarfs im Nichtwohngebäudebestand bereitzustellen. Die Gesamtzahl der Archetypen sollte klein gehalten werden, aber gleichzeitig die Bandbreite der Bauweisen und Nutzungen im sehr vielfältigen Nichtwohngebäudebestand adäquat abbilden. Ursprünglich im Projekt FlexGeber entwickelt, diente die Typologie dazu, typische Lastprofile des Gebäudeenergiebedarfs in der Nutzungsphase zu berechnen und damit Flexibilitätsoptionen zwischen dem Stromnetz und dem deutschen Nichtwohngebäudebestand zu quantifizieren. Zielgröße für eine daraus zu entwickelnde allgemeine Typologie der Nichtwohngebäude ist also der Gebäudeenergiebedarf in der Nutzungsphase.

Identifizierung relevanter Merkmale für den Gebäudeenergiebedarfs in der Nutzungsphase

Die Schlüsselmerkmale mit einem großen Einfluss auf den Gebäudeenergiebedarf in der Nutzungsphase wurden durch mehrere Studien identifiziert, wie z.B. (Corrado, Mechri 2009; Famuyibo et al. 2012; Heo 2011; Olivero et al. 2016; Smith 2009). Sie können im Wesentlichen zwei Kategorien zugeordnet werden: Gebäudebezogene Merkmale wie thermische Eigenschaften (Widerstand und Leitfähigkeit) einschließlich Wärmebrücken der Hülle (Wände, Dach, Boden und Fenster), Größe und Form (Fläche/Volumen), technische Systemeffizienz (Heizung, Kühlung und Lüftung (Wärmerückgewinnung)) usw. einerseits und nutzungsbezogene Merkmale wie

Raumlufttemperatur, Sollwerte für Heizung, Kühlung und Befeuchtung, Luftwechselraten einschließlich Infiltration, mechanische und natürliche Luftwechselraten, Anzahl der Personen, Tätigkeit der Personen (Stoffwechselrate), Geräteleistungsdichte usw. andererseits.

Auch Umweltfaktoren wie Klima, Standort und Ausrichtung (Verschattungssituation) haben einen großen Einfluss auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen eines Gebäudes. Da die Simulationen jedoch die Umweltfaktoren einbeziehen, liegt der Schwerpunkt der Typologie-Entwicklung auf den gebäude- und nutzungsbezogenen Faktoren.

Stellvertretervariablen für die Klassifizierung

Für die Klassifizierung der Grundgesamtheit von Nichtwohngebäuden in Archetypen sind die oben identifizierten relevanten Merkmale, die stark mit der Zielvariablen korrelieren, die Grundlage für die Auswahl von Stellvertretervariablen. Zwei Stellvertretervariablen werden häufig in Gebäudetypologien verwendet, die auf den Energiebedarf des Gebäudes abzielen (Loga et al. 2016; TABULA Project Team 2012): die Baualtersklasse (BAK) und die Gebäudefunktion (GF). Der Grund für ihre häufige Anwendung ist die Korrelation mit vielen Gebäudemerkmalen, die mit dem Energiebedarf zusammenhängen.

Die im vorherigen Unterabschnitt identifizierten gebäudebezogenen Merkmale korrelieren stark mit dem Baujahr des Gebäudes. Dies ist auf den Einfluss von architektonischen Trends, Materialverfügbarkeiten und baulichen, Brandschutz- und Energiesparanforderungen in verschiedenen Perioden zurückzuführen. Dieser Einfluss zeigt sich beispielsweise in den typischen U-Werten (Klauß et al. 2009; Thiel, Riedel 2011) der und Gebäudetechnik (Niklasch, Veerkamp 2014). Daher ist die BAK eine wichtige Stellvertretervariable, die viele gebäudebezogene Variablen repräsentiert.

Die nutzungsbezogenen Merkmale hingegen lassen sich eindeutig mit der Gebäudefunktion in Verbindung bringen, beispielsweise dem Einfluss der Nutzungszeiten, der spezifischen Geräteleistungsdichte und den Belegungsprofilen (z.B. Nutzungsprofile von Normen wie DIN V 18599 oder SIA 2024). Ihre Berücksichtigung ist von großer Bedeutung, da jeder gemessene Energieverbrauch notwendigerweise den Einfluss des Nutzers einschließt. Somit ist die Gebäudefunktion eine gute Stellvertretervariable für nutzungsbezogene Faktoren.

Klassendefinition

Die Werte der Proxy-Variablen BAK basieren hauptsächlich auf der Entwicklung der gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden in Deutschland im Laufe der Zeit. Die 1. Wärmeschutzverordnung (WSchV) trat 1978 in Kraft und beeinflusste die thermischen Eigenschaften der danach errichteten Gebäude stark. Alle Gebäude, die vor 1978 gebaut wurden, mussten keine energetischen Mindestanforderungen erfüllen und gelten daher als "Altbauten". "Neubauten" sind aus Sicht des ENOB:dataNWG-Datensatzes alle Gebäude, die zwischen 2010 und 2019 gebaut wurden, also nach der letzten großen Erhöhung der Mindestanforderungen in der ab 2010 geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009. Alle Gebäude, die im vorgenannten Sinne weder "neu" noch "alt" sind, unterlagen unterschiedlichen Stufen der Energiegesetzgebung und werden im Folgenden als "Zwischenbauten" bezeichnet.

Die im Fragebogen von ENOB:dataNWG aufgeführten primären Gebäudefunktionen eignen sich auch als Ausprägungen der Proxy-Variablen GF. Diese elf Ausprägungen wurden entwickelt, um alle relevanten Gebäudefunktionen von Nichtwohngebäuden in Deutschland abzudecken. Sie fassen die früheren Ansätze zur Typisierung zusammen, z.B. aus dem Bauwerkszuordnungskatalog (ARGEBAU 2010), den Gebäudefunktionssignaturen des Statistischen Bundesamtes und der aus Projektperspektive jüngsten Nichtwohngebäudetypologie für Deutschland (Deilmann et al. 2013) Diese Klassifizierung wurde auch durch die Notwendigkeit beeinflusst, dass die Funktion des Gebäudes im Screening-Prozess des Projekts ENOB:dataNWG aus der Betrachtung der Gebäude vom öffentlichen Raum aus bestimmbar sein musste. (Busch, Müller 2020).

Die Stichprobengröße ist jedoch ein limitierender Faktor bei der Bildung von Gebäudetypen, insbesondere in der GF. Für einige Klassen ist die vorgeschlagene Anzahl von Gebäudetypen bereits mit sehr niedrigen Fallzahlen aufgrund fehlender Werte in der Umfrage (siehe unten) verbunden. Daher wird eine zusätzliche Aggregationsebene wie in Tabelle 1 vorgeschlagen: Dienstleistungsgebäude (GF 1 bis 7 und 9, d.h. Bürogebäude, Krankenhäuser, Hotels, etc.) und Produktions- und ähnliche Gebäude (GF 8, 10 und 11, d.h. Lagerhallen, industrielle Produktionsgebäude, etc.). Signifikante Unterschiede in nutzungsrelevanten Faktoren, wie z.B. Komfortanforderungen für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung, Belegungspläne usw., sind entlang dieser Aufteilung zu vermuten.

Tabelle 1 Aggregationsebenen der Ausprägungen der Proxy-Variablen Gebäudefunktion

I. Dienstleistungsgebäude	II. Produktionsgebäude und ähnliche
1. Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude	8. Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude
2. Gebäude für Forschung und Hochschullehre	10. Technikgebäude (Ver- und Entsorgung)
3. Gebäude für Gesundheit und Pflege	11. Verkehrsgebäude
4. Schule, Kindertagesstätte und sonst. Betreuung	
5. Gebäude für Kultur und Freizeit	
6. Sportgebäude	
7. Beherbergungs- oder Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude	
9. Handelsgebäude	

Hochrechnung aus der Stichprobe: Summenschätzer, Mittelwertschätzer und Standardfehler

Die hier beschriebenen Gebäudetypen der Gebäudetypologie sind "synthetische mittlere Gebäude", nach dem von (Loga et al. 2012) vorgeschlagenen Konzept. Archetypen können durch Bilder von Beispielgebäuden illustriert werden, sind aber nicht identisch mit ihnen.

Die Variablenausprägungen der Gebäudetypen werden, wie oben erläutert, aus einer Stichprobe hochgerechnet, sind also nicht aus vollständiger Kenntnis der Grundgesamtheit abgeleitet. Um die Ergebnisse zu verstehen, werden die verwendeten Begriffe im Folgenden definiert und ihre Bedeutung wird kurz erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der Schätzmethode finden sich in (Cischinsky 2021 S. 55 ff.).

Unser Ziel in ENOB:dataNWG war es, Parameter der Grundgesamtheit, wie z.B. die Gesamtzahl t der GEG-relevanten⁹ NWG in Deutschland, aus seiner Stichprobe s mit Hilfe des sogenannten Horvitz-Thompson (Summen-)Schätzers \hat{t}_π (Särndal et al. 2003 S. 42) (vgl. Gleichung 1) zu schätzen.

$$\hat{t}_\pi = \sum_{k \in s} \frac{y_k}{\pi_k} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit

$\pi_k > 0$ Ziehungswahrscheinlichkeit für NWG k

y_k Merkmalsausprägung des interessierenden Merkmals y von Untersuchungseinheit k (d.h. von NWG k)

s Menge der Untersuchungseinheiten (d.h. NWG), die über die gezogene Stichprobe identifiziert wurden

Da der HT-Schätzer den Wert einer Variablen y jedes Stichproben-NWG k durch die entsprechende Ziehungswahrscheinlichkeit π_k teilt und dann über alle Stichproben-NWGs aufsummiert, werden die Variablenwerte von NWGs in der Stichprobe mit hoher Ziehungswahrscheinlichkeit niedrig gewichtet und solche mit geringer Ziehungswahrscheinlichkeit entsprechend hoch. Der reziproke Wert der Ziehungswahrscheinlichkeit eines NWG $1/\pi_k$ ist der Hochrechnungsfaktor, der angibt, wie viele NWGs der Grundgesamtheit das Stichproben-NWG repräsentiert.

⁹ Gebäude, die unter das Gebäudeenergiegesetz (GEG2020 2020) fallen, früher Energieeinsparverordnung (EnEV 2016 2015), und die im Allgemeinen thermisch konditioniert (beheizt und/oder gekühlt) sind.

Mit Hilfe des HT-Schätzers ergibt sich der Schätzwert der Anzahl der GEG-relevanten NWGs in Deutschland, \hat{N}_{GEG} , als Ergebnis einer Summenschätzung, wie in Gleichung 2.

$$\hat{N}_{GEG} = \sum_{k \in S} \frac{NWG_k}{\pi_k} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit

$$NWG_k = \begin{cases} 1, & \text{wenn die Untersuchungseinheit } k \text{ GEG - relevant ist} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$GEG \subset M$ Menge der GEG-relevanten NWGs als Teilmenge der Grundgesamtheit aller NWGs M

Eine solche Hochrechnung aus einer Stichprobe auf eine Grundgesamtheit unterliegt immer einer stichprobenimmanenten Unsicherheit, dem Standardfehler $\hat{\sigma}(\hat{N}_{GEG})$ ¹⁰, die aus der Stichprobe ebenfalls geschätzt werden kann. Daraus ergibt sich die geschätzte Zahl der GEG-relevanten NWGs in Deutschland von $\hat{N}_{GEG} = 1,981 \pm 0,152$ Millionen.

Bei anderen Hochrechnungen kann es jedoch sein, dass es für einige Stichproben-NWGs keine Werte für die betreffende Variable gibt, z.B. weil einige Befragte die erforderlichen Informationen nicht bereitstellen konnten. Soll beispielsweise der spezifische Transmissionswärmeverlust der Außenwände $\hat{H}_{T,AW}$ aller GEG-relevanten Nichtwohngebäude geschätzt werden, so gibt es bei einigen Stichproben-NWGs keine Angaben zur Wandfläche bzw. zu den Wärmedurchgangskoeffizienten. Bei solchen Gebäuden werden die Variablenwerte als sogenannte ungültige oder fehlende Werte kodiert¹¹. Eine Summenschätzung, z.B. von $\hat{H}_{T,AW}$, wird in einem solchen Fall in zwei Schritten vorgenommen. Zunächst wird wie in Gleichung 3 der Mittelwert $\hat{\bar{H}}_{T,AW}$ als Quotient zweier Summenschätzer bestimmt, und zwar nur für die NWG in der Stichprobe mit gültigen Werten für die betreffenden Variablen.

$$\hat{\bar{H}}_{T,AW} = \frac{\sum_{k \in \tilde{s}} \frac{U_{AW,k} \cdot A_{AW,k}}{\pi_k}}{\sum_{i \in \tilde{s}} \frac{NWG_i}{\pi_i}} = \frac{\sum_{k \in \tilde{s}} \frac{H_{T,AW,k}}{\pi_k}}{\hat{N}_{GEG}} = \frac{\hat{H}_{T,AW,\tilde{s}} \left[\frac{W}{K} \right]}{\hat{N}_{GEG}} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit

$\overline{GEG} \subset M$ Menge der GEG-relevanten NWGs mit gültigen Werten für $U_{AW,k}$ und $A_{AW,k}$ als Teilmenge der Grundgesamtheit M aller NWG

$\tilde{s} \subset s$ Teilmenge der Untersuchungseinheiten mit gültigen Werten $U_{AW,k}$ und $A_{AW,k}$, die durch die gezogene Stichprobe identifiziert wurden

Der spezifische Transmissionswärmeverlust des gesamten Gebäudebestands, $\hat{H}_{T,Wall}$, ergibt sich dann wie in Gleichung 4 als Produkt mit der nach Gleichung 2 ermittelten Gesamtzahl \hat{N}_{GEG} .

$$\hat{H}_{T,AW} = \hat{\bar{H}}_{T,AW} \cdot \hat{N}_{GEG} \left[\frac{W}{K} \right] \quad \text{Gleichung 4}$$

Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Teilmenge der Stichproben-NWGs mit ungültigen Variablenwerten strukturell identisch mit der Teilmenge der NWGs mit gültigen Werten ist¹². Der Standardfehler dieses Produktes wird im Projekt mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes ermittelt.

¹⁰ Der Standardfehler wird in allen Hochrechnungen angegeben, aber "Fehler" bedeutet nicht "falsch". Vielmehr handelt es sich bei "Fehlern" im Sinne der Stichprobentheorie um Unsicherheiten, die nicht vollständig beseitigt werden können. Sie ergeben sich daraus, dass es aus verschiedenen Gründen nicht möglich ist, die Übereinstimmung der Hochrechnung aus einer Stichprobe mit absoluter Sicherheit mit den tatsächlichen Bedingungen in der Grundgesamtheit zu gewährleisten. Standardfehler sind immer Teil der wissenschaftlich korrekten Darstellung der Ergebnisse. Man muss es so lesen: Der Summenwert ist die wahrscheinlichste Schätzung für die Anzahl der NWGs, die aus der Stichprobe für den wahren, aber unbekanntem Wert in der Grundgesamtheit ermittelt werden kann. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% liegt die wahre, aber unbekannte Anzahl im Bereich eines Standardfehlers um den geschätzten Wert.

¹¹ Ungültige oder fehlende Werte von Variablen werden mit negativen ganzen Zahlen codiert.

¹² Diese Annahme ist zulässig, wenn die fehlende Information über den betreffenden Wert nicht mit einem anderen Wert korreliert, d.h. rein zufällig in der Stichprobe verteilt ist.

Monitoring- und Modelleingangsvariablen

Einige relevante Variablen für eine Energiebedarfsberechnung sind schwer direkt in einer Befragung zu ermitteln. Beispielsweise weiß typischerweise nicht jeder Befragte, was der Wärmedurchgangskoeffizient U einer Wand ist oder wie diese Information für das betreffende Gebäude ermittelt werden könnte. Aus diesem Grund fragte der Fragebogen nach „haptischeren“ Variablen wie der Dämmstärke, den sogenannten Monitoringvariablen, die von den Befragten mutmaßlich ohne weitere Hilfsmittel spezifiziert werden können. Am Beispiel des U -Wertes opaker Bauteile wird im Folgenden erläutert, wie aus den Monitoringvariablen die erforderlichen Modelleingaben für die Simulation des Gebäudeenergiebedarfs abgeleitet wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um bestehende NWG handelt, d.h. um Gebäude, die möglicherweise in unterschiedlichem Maße im Hinblick auf die Energieeffizienz modernisiert wurden.

Der Fragebogen fragte zunächst die Bauweise der opaken Bauteile und dann deren aktuellen Zustand ab. Vor allem wurde festgestellt, ob ein opakes Bauteil des Gebäudes eine Wärmedämmschicht aufweist, wenn ja, welcher Prozentsatz der Bauteilfläche $a_{BT,nd}$ nachträglich gedämmt wurde und wie dick die Dämmschicht $d_{BT,nd}[m]$ zum Zeitpunkt der Befragung war.

Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass Gebäude die zum Zeitpunkt ihrer Errichtung geltenden gesetzlichen Mindestanforderungen an die Wärmedämmung erfüllten¹³. Die entsprechenden Normwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile $U_{BT,0}$ stammen aus der einschlägigen Literatur, für Außenwände und Fenster aus (BMWi, BMU 2015) und (Thiel, Riedel 2011) sowie für Dach bzw. oberste Geschossdecke und die Bodenplatte bzw. Kellerdecke aus (Loga et al. 2021 S. 125 ff.). Basierend auf typischen Konstruktionen opaker Bauteile, wurden Richtwerte für die entsprechenden Dämmstärken $d_{BT,0}[m]$ angenommen¹⁴.

Der Wärmedurchgangskoeffizient eines opaken Bauteils, das mit einem Material der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{BT,nd} \left[\frac{W}{mK} \right]$ auf eine Gesamtdämmstärke $d_{BT,nd}[m]$ nachträglich gedämmt wird, wird nach Gleichung 5 berechnet.

$$U_{BT,nd} = \frac{1}{\frac{1}{U_{BT,0}} + \frac{d_{BT,nd}}{\lambda_{BT,nd}} - \frac{d_{BT,0}}{\lambda_{BT,0}}} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad \text{Gleichung 5}$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils, das an $a_{BT,nd}\%$ seiner Bauteilfläche nachträglich gedämmt wurde, U_{BT} , ergibt sich dann wie in Gleichung 6 unter Berücksichtigung auch des möglicherweise noch nicht modernisierten Anteils.

$$U_{BT} = U_{BT,nd} \cdot a_{BT,nd} + U_{BT,0} \cdot (1 - a_{BT,nd}) \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad \text{Gleichung 6}$$

Bei transparenten Bauteilen wurde analog angenommen, dass die anfänglich während der Errichtung des Gebäudes verbauten Glasarten den gesetzlichen Mindestanforderungen entsprachen und Verbesserungen der Verglasungsqualität nur im Falle einer Modernisierung umgesetzt wurden.

Ergebnisse

Die NWG-Typologie wurde aus einer repräsentativen Stichprobenerhebung entwickelt, um eine statistisch valide Grundlage für die Berechnung des Gebäudeenergiebedarfs, als Zielwert, des GEG-relevanten Nichtwohngebäudebestands in Deutschland, als Grundgesamtheit, zu schaffen. Mindestens 6, in vielen Fällen 33, Gebäudetypen werden ausgewiesen, unterschieden nach 3 Ausprägungen der Proxyvariablen Baualtersklasse und 2 bzw. 11 Ausprägungen der Gebäudefunktion, wenn die Fallzahlen groß genug sind. In diesem Klassifikationsschema werden Variablenausprägungen der Gebäudetypen als Mittelwertschätzer sowohl für Zustandsvariablen wie U -Werte als auch für Mengenvariablen wie Bauteilflächen angegeben. Die Zustandsgrößen liegen für den Zeitpunkt des Baujahres der Gebäude vor und für den (teil-)modernisierten Zustand zum Zeitpunkt der Erhebung zwischen April 2018 und August 2019, die Mengengrößen werden aus den Geobasisdaten mit dem Ausgabedatum April 2015 abgeleitet.

¹³ Es wird angenommen, dass Gebäude in der Regel so errichtet wurden, dass die gesetzlichen Mindestanforderungen eingehalten wurden. Da Abweichungen sowohl nach oben als auch nach unten nicht ausgeschlossen werden können, kann eine zusätzliche nicht-statistische Unsicherheit enthalten sein, die in der Erhebung aber nicht quantifiziert werden konnte.

¹⁴ NWGs, deren Außenwände in Massivbauweise mit Leichtbauwerkstoffen errichtet wurden, erfüllen in der Regel auch ohne Dämmschichten die Anforderungen an den Wärmedurchgang. Wenn die Frage, ob das Bauteil isoliert ist, für diese Gebäude mit "Nein" beantwortet wurde, wurde der Standard- U -Wert für das Baujahr angenommen, aber eine Dämmstärke von 0,00 [m] festgelegt.

Tabelle 2 Absolute Häufigkeiten $\hat{N}_{GEG,i}$, Standardfehler $\hat{\sigma}(\hat{N}_{GEG,i})$ und entsprechende Fallzahlen $\langle n_i \rangle$ der Archetypen i GEG-relevanter Nichtwohngebäude in Deutschland

Gebäudetypen i absolute Häufigkeiten $\hat{N}_{GEG,i} \pm \hat{\sigma}(\hat{N}_{GEG,i})$ und Fallzahlen $\langle n_i \rangle$ (ENOB: dataNWG Hochrechnung 1.3.13)	Altbauten (vor 1979) [Tsd.]	Zwischenbauten (1979 - 2009) [Tsd.]	Neubauten (vor 2010) [Tsd.]	Total [Tsd.]
I Dienstleistungsgebäude	751 ± 84 <2.522>	426 ± 63 <1.269>	(45 ± 47) <149>	1.222 ± 115 <3.940>
1 Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude	190 ± 31 <632>	106 ± 27 <351>	(11 ± 6) <31>	307 ± 45 <1.014>
2 Gebäude für Forschung und Hochschullehre	(12 ± 7) <63>	(8 ± 4) <51>	(3 ± 2) <16>	23 ± 9 <130>
3 Gebäude für Gesundheit und Pflege	24 ± 8 <110>	33 ± 12 <70>	(5 ± 3) <13>	63 ± 15 <193>
4 Schule, Kindertagesstätte und sonst. Betreuungsgebäude	87 ± 12 <806>	58 ± 27 <290>	(9 ± 6) <33>	154 ± 31 <1.129>
5 Gebäude für Kultur und Freizeit	92 ± 18 <349>	41 ± 19 <132>	(8 ± 6) <20>	141 ± 28 <501>
6 Sportgebäude	51 ± 14 <231>	22 ± 6 <134>	(4 ± 4) <11>	78 ± 17 <376>
7 Beherbergungs- oder Unterbringungs- gebäude, Gastronomie- oder Verpflegungs- gebäude	202 ± 51 <227>	67 ± 32 <115>	(2 ± 1) <11>	270 ± 58 <353>
9 Handelsgebäude	93 ± 25 <104>	90 ± 26 <126>	3 ± 1 <14>	187 ± 39 <244>
II Produktionsgebäude und ähnliche	395 ± 66 <542>	331 ± 54 <555>	32 ± 11 <66>	758 ± 88 <1.163>
8 Produktions-, Werkstatt-, Lager- und Betriebsgebäude	365 ± 66 <501>	271 ± 46 <521>	30 ± 11 <64>	666 ± 82 <1.086>
10 Technikgebäude (Ver- und Entsorgung)	17 ± 7 <26>	53 ± 25 <25>	(0) <1>	70 ± 26 <52>
11 Verkehrsgebäude	(13 ± 7) <15>	(7 ± 6) <9>	(1 ± 1) <1>	22 ± 9 <25>
Total	1.146 ± 110 <3.064>	757 ± 87 <1.824>	77 ± 16 <215>	1.981 ± 152 <5,107>

Häufigkeiten in Klammern ($y \pm \Delta y$) bedeuten, dass der relative Standardfehler $\geq 50\%$ oder die Fallzahl $n_i \leq 5$.

Für alle Hochrechnungen absoluter Größen auf die Grundgesamtheit sind die absoluten Häufigkeiten der Gebäudetypen wichtig, die ebenfalls aus der Stichprobe geschätzt werden können. Diese sind in Tabelle 2 exemplarisch für der Inhalte der Typologie zusammen mit dem jeweiligen Standardfehler angegeben. Die Angaben sind in Klammern gesetzt, wenn der relative Standardfehler $\hat{\sigma}(\hat{N}_{GEG,i}) \geq 50\%$ oder die Fallzahl gültiger Werte $n_i \leq 5$. Bei der Verwendung für weitere Berechnungen sollte immer auf die begrenzte Aussagekraft hingewiesen werden.

Die Typologie¹⁵ umfasst derzeit folgende Variablen der Gebäudetypen, die für die Berechnung des Energiebedarfs erforderlich sind: Mittlere spezifische Transmissionswärmeverluste $\hat{H}_{T,BT}$ (vgl. Tabelle 3) und mittlere Bauteilflächen \hat{A}_{BT} (vgl. Tabelle 4) sowie mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten \hat{U}_{BT} (vgl. Tabelle 5) der vier Bauteile (BT) Außenwand, Dach bzw. oberste Geschossdecke, Bodenplatte bzw. Kellerdecke, Fenster bzw. Verglasung. Zusätzlich werden mittlere geometrische Größen wie Bruttogeschossfläche, Nettoraumfläche, Bruttovolumen sowie Flächenverhältnisse, wie z.B. Außenwandfläche zu Nettoraumfläche, und die Kompaktheit der Gebäude als Verhältnis der Gebäudehüllenfläche zum Bruttovolumen (A/V) bereitgestellt. Mit Hilfe Dynamic ISO Building Simulators (DIBS)¹⁶ wurden die Nutzenergiebedarfe aller Stichprobengebäude bestimmt

¹⁵ Die gesamte Typologie steht auf <https://www.datanwg.de/downloads/> zum Download zur Verfügung.

¹⁶ Der Dynamic ISO Building Simulator (DIBS) ist ein Simulationsprogramm zur Berechnung des Endenergiebedarfs für Heizung und Kühlung von Nichtwohngebäuden in Deutschland. Der DIBS baut auf dem etablierten dynamischen Stundenbilanzverfahren der ISO 13790 auf und erweitert dieses um verschiedene Aspekte, z.B. die Nachtlüftung zur Reduktion des sommerlichen

und daraus mittlere spezifische Nutzenergiebedarfe der Gebäudetypen hochgerechnet. Die Effizienz der Wärme- und Kälteerzeuger wird durch mittlere Erzeugeraufwandszahlen für jeden Gebäudetyp beschrieben.

Als Beispiel zur Veranschaulichung der Anwendung der Typologie wird der absolute Transmissionswärmebedarf durch die Außenwände $\hat{Q}_{T,AW}$ [TWh/a] des gesamten GEG-relevanten NWG-Bestands in Deutschland berechnet. Mit dem spezifischen Transmissionswärmeverlust der Außenwände $\hat{H}_{T,AW}$ (ohne Wärmebrücken) aus Tabelle 3, der absoluten Häufigkeit \hat{N}_{GEG} aus Tabelle 2 und den Gradtagzahlen $D_{20/15} = 3.515 \text{ Kd/a}$ ¹⁷ erhält man:

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{T,AW} &= \hat{H}_{T,AW} \cdot \hat{N}_{GEG} \cdot D_{20/15} \\ &= 517 \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right] \cdot 1,981 \cdot 10^6 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{TWh}}{\text{W}} \right] \cdot 3.515 \left[\frac{\text{Kd}}{\text{a}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{d}} \right] \\ &= 86,3 \pm 9,1 \left[\frac{\text{TWh}}{\text{a}} \right] \end{aligned} \quad \text{Gleichung 7}$$

Die zugehörigen Standardfehler können bei Größen, die aus Variablen der Gebäudetypen abgeleitet werden, nach dem Gaußschen Gesetz der Fehlerfortpflanzung bestimmt werden. (vgl. (Cischinsky 2021 S. 59 ff.).

Tabelle 3 Auszug aus den Ausprägungen der spezifischen Transmissionswärmeverluste der Außenwände $\hat{H}_{T,AW,i}$ der Typologie der GEG-relevanten Nichtwohngebäude in Deutschland

Gebäudetyp i mittlere spezifischer Transmissionswärmeverlust der Außenwand $\hat{H}_{T,AW,i} \pm \hat{\sigma}(\hat{H}_{T,AW,i}) \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$ und Fallzahlen $\langle n_i \rangle$ (ENOB: dataNWG Hochrechnung 1.3.7.1)	Altbauen (vor 1979) [W/K]	...	Total [W/K]
I Dienstleistungsgebäude	767 ± 71 <2.242>		560 ± 50 <3.427>
1 Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude	914 ± 196 <560>		644 ± 131 <880>
2 Gebäude für Forschung und Hochschullehre	1.450 ± 609 <58>		844 ± 282 <119>
3 Gebäude für Gesundheit und Pflege	1.349 ± 330 <99>		731 ± 184 <165>
...			
Total	697 ± 56 <2.724>		517 ± 38 <4.460>

Tabelle 4 Auszug aus den Ausprägungen der Außenwandflächen $\hat{A}_{AW,i}$ der Typologie der GEG-relevanten Nichtwohngebäude in Deutschland

Gebäudetyp i mittlere Außenwandfläche $\hat{A}_{AW,i} \pm \hat{\sigma}(\hat{A}_{AW,i}) [\text{m}^2]$ und Fallzahlen $\langle n_i \rangle$ (ENOB: dataNWG Hochrechnung 1.3.4)	Altbauten (vor 1979) [m²]	...	Total [m²]
I Dienstleistungsgebäude	687 ± 66 <2.458>		622 ± 48 <3.845>
1 Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude	706 ± 111 <618>		605 ± 79 <994>
2 Gebäude für Forschung und Hochschullehre	1.136 ± 400 <60>		905 ± 234 <126>
3 Gebäude für Gesundheit und Pflege	1.418 ± 261 <110>		976 ± 154 <189>
...			
Total	630 ± 50 <2.983>		611 ± 37 <4.981>

Kältebedarfs. Der DIBS steht open source unter der MIT License zur freien Nutzung auf dem GitHub Repository [IWUGERMANY/DIBS---Dynamic-ISO-Building-Simulator](https://github.com/iwugermany/dibs---dynamic-iso-building-simulator) zur Verfügung. Im dortigen Wiki sind eine Anleitung zur schrittweisen Installation sowie eine vollständige Dokumentation verfügbar. Siehe auch (Bischof et al. 2022) Langzeitmittel der Gradtagzahlen bei Raumtemperatur 20°C und Heizgrenztemperatur 15°C von 2001 bis 2021 an der Klimastation Potsdam (Brandenburg). Quelle: Gradtagzahlen Deutschland verfügbar unter <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/#c205>

¹⁷

Der flächengewichtete Mittelwert der Wärmedurchgangskoeffizienten eines Bauteils BT von Gebäudetyp i , $\hat{U}_{BT,i}$, ergibt sich dann aus Gleichung 8:

$$\hat{U}_{BT,i} \left[\frac{W}{m^2K} \right] = \frac{\hat{H}_{T,BT,i}}{\hat{A}_{BT,i}} = \frac{\hat{H}_{T,BT,i}}{\hat{A}_{BT,i}} \quad \text{Gleichung 8}$$

Tabelle 5 Auszug aus den Ausprägungen der flächengewichteten Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwände $\hat{U}_{AW,i}$ der Typologie der GEG-relevanten Nichtwohngebäude in Deutschland

Gebäudetyp i mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand $\hat{U}_{AW,i} \pm \hat{\sigma}(\hat{U}_{AW,i}) \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ und Fallzahlen $\langle n_i \rangle$ (ENOB: dataNWG Hochrechnung 1.3.7.1)	Altbauten (vor 1979) [W/m ² K]	...	Total [W/m ² K]
I Dienstleistungsgebäude	1,12 ± 0,10 <2.242>		0,90 ± 0,08 <3.427>
1 Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude	1,29 ± 0,28 <560>		1,06 ± 0,22 <880>
2 Gebäude für Forschung und Hochschullehre	1,28 ± 0,54 <58>		0,93 ± 0,31 <119>
3 Gebäude für Gesundheit und Pflege	0,95 ± 0,23 <99>		0,75 ± 0,19 <165>
...			
Total	1,11 ± 0,09 <2.724>		0,85 ± 0,06 <4.460>

Diskussion und Ausblick

Die oben dargestellten Ergebnisse stellen nur einen Teil der verfügbaren Archetypenvariablen dar, die in der deutschen Nichtwohngebäudetypologie enthalten sind und zeigen exemplarisch mögliche Anwendungen auf. Schrittweise werden weitere relevante Variablen für die Berechnung des Gebäudeenergiebedarfs in die Typologie aufgenommen und auf der ENOB:dataNWG-Homepage (www.datanwg.de) veröffentlicht. Zukünftige Analysen sollen auch standardisierte Maßnahmen für die energetische Modernisierung und den Energiebedarf entsprechend ertüchtigter Gebäude ergänzen. Auch die Ermittlung der mittleren Materialmengen der Gebäudetypen und typischer Sanierungsmaßnahmen, nach der Methode von (Buschka et al. 2021), wäre eine vorteilhafte zukünftige Erweiterung der deutschen NWG-Typologie.

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, ist eine Nichtwohngebäudetypologie, basierend auf Daten aus einer repräsentativen Stichprobenerhebung, mit synthetischen mittleren Gebäuden als Gebäudetypen und Mittelwertschätzern mit Standardfehlern als Variablensatz, ein nützliches Werkzeug zur Berechnung des Energiebedarfs eines Gebäudebestands, z.B. in Szenarien-Analysen in Klimaschutzkonzepten. Neu ist dabei, dass der Energiebedarf im Nichtwohngebäudebestand nun auch im Bottom-Up-Ansatz berechnet werden kann. Wie in Gleichung 7 gezeigt, können die Daten einfach in einer Tabellenkalkulation oder in Plausibilitätsprüfungen sogar durch Kopfrechnen verwendet werden.

Dennoch müssen die Grenzen der Anwendung beachtet werden, was sich z.B. darin zeigt, dass die Fallzahlen für einige Gebäudetypen sehr klein (z.B. $n \leq 5$) sind und Standardfehler in der Folge zu groß werden, um vernünftige Rückschlüsse aus den Daten ziehen zu können. In solchen Fällen ist zu überlegen, ob die Unterscheidung der Archetypen nach 3 Baualtersklassen und 2 Gebäudefunktionen statt 11 für die beabsichtigte Analyse ausreichend sein kann. Während für die meisten Altbauten und viele Zwischenbauten ausreichende Fallzahlen und vertretbare Standardfehler erreicht werden konnten, sind die Fallzahlen für andere, insbesondere für Neubauten, nicht zufriedenstellend. Zukünftige Stichprobenerhebungen sollten mit höheren Fallzahlen geplant werden, um die statistischen Unsicherheiten weiter zu verringern. Eine regelmäßige Wiederholung solcher Erhebungen, im Sinne eines Monitorings der Energieeffizienz des Gebäudebestandes und zur Bewertung der Wirksamkeit politischer Instrumente, ist in jedem Falle außerordentlich wünschenswert, z.B. um die Wirkung von Klimaschutzprogrammen zeitnah überprüfen zu können.

Es werden die Standardfehler der Variablenausprägungen der Gebäudetypen angegeben, diese decken jedoch nur die statistischen Unsicherheiten der Hochrechnungen ab. Modelleingangsvariablen, wie z.B. die U-Werte, die auf externen Quellen basieren, die keine Unsicherheiten spezifizieren, verursachen zusätzliche nicht-statistische Unsicherheiten, die bisher nicht systematisch quantifiziert werden konnten. Daher ist zu erwarten, dass die

Unsicherheiten solcher verarbeiteten Variablen größer sind als die dargestellten Werte. Für eine zuverlässige Quantifizierung und Berücksichtigung dieser Unsicherheiten sind detailliertere Untersuchungen erforderlich. Ein guter Ansatz dazu findet sich in (Loga et al. 2021).

Mit zunehmender Verfügbarkeit von Geodaten werden Gebäudetypologien häufig dazu verwendet, um geometrischen Objekten, die einzelne reale Gebäude darstellen, energierelevante Merkmale des entsprechenden Gebäudetyps zuzuordnen, wie z.B. in "Wärmeatlanten" (Amt für Energie und Klima 2022). Dies ist insofern problematisch, als die durchschnittlichen Variablenwerte der Gebäudetypen in der Regel von den tatsächlichen Eigenschaften der realen Gebäude abweichen, teilweise sogar erheblich. Daher wird diese Anwendung von Gebäudetypologien nicht empfohlen. Gebäudetypologien sollten nur bei der Modellierung von Gebäudebeständen verwendet werden.

Mit der INSPIRE-Richtlinie wurden EU-Mitgliedstaaten verpflichtet, ihre Geodateninfrastrukturen grenzüberschreitend kompatibel und gemeinsam nutzbar zu machen¹⁸. Gemäß der INSPIRE-Roadmap sollen die Anforderungen bis Ende 2021 in allen EU-Mitgliedstaaten (EU-MS) umgesetzt sein. Daher sollten die Methodik der Datenerhebung von Gebäudebeständen auf der Grundlage von Geodaten, wie in ENOB:dataNWG, und die Erstellung von Gebäudetypologien aus synthetischen mittleren Gebäuden auf andere EU-Mitgliedstaaten übertragbar sein.

Mit dieser Typologie stehen erstmals statistisch valide Daten für eine hoch aufgelöste Bottom-up-Analyse des Energiebedarfs des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland zur Verfügung. Die Typologie soll in Zukunft erweitert werden. Die Verwendung der Nichtwohngebäudetypologie in Deutschland in anderen Forschungsprojekten ist erwünscht. Bei vergleichbarer Qualität könnten deren Ergebnisse wiederum in die Typologie einfließen.

Acknowledgements

Die Typologieentwicklung wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts "FlexGeber - Demonstration von Flexibilitätsoptionen im Gebäudesektor und deren Integration in das Energiesystem in Deutschland" durchgeführt (Förderkennzeichen 03EGB0001).

Der repräsentative Datensatz, der die Typologieentwicklung ermöglichte, wurde im Rahmen des Projekts "ENOB:dataNWG - Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude: Primärdatenerhebung zur Erfassung der Struktur und energetischen Qualität von Nichtwohngebäuden in Deutschland" erhoben, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde (Förderkennzeichen 03ET1315).

CRedit Autorenbeitragsklärung

Michael Hörner: Konzept, Methodik, Projektdurchführung, Auswertung (Hauptteil), Projektverwaltung, Originalentwurf des Artikels, Überprüfung & Bearbeitung des Artikels.

Julian Bischof: Konzept, Methodik, Untersuchung, Auswertung (Mitwirkung), Visualisierung, Originalentwurf des Artikels, Review & Editieren des Artikels.

Literatur

Amt für Energie und Klima (2022). *Wärmekataster für die Freie und Hansestadt Hamburg*.

Bischof, Julian; Duffy, Aidan (2022). Life-cycle assessment of non-domestic building stocks: A meta-analysis of current modelling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111743.

Bischof, Julian; Knoll, Simon; Duffy, Aidan (2022). *DEVELOPMENT OF A PYTHON-BASED SIMPLIFIED HOURLY BUILDING MODEL FOR NON-DOMESTIC BUILDING STOCK OPERATIONAL ENERGY SIMULATION*. 7 [Conference Paper]. Weimar: IWU, TU Dublin.

BMVBS (Hg.) (2011). Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. In: *BMVBS-Online-Publikation 16/2011*.

BMWi (2019). *Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende, Die Energie der Zukunft, Berichtsjahr 2017*.

BMWi (2020). *Langfristige Renovierungsstrategie der Bundesregierung*. Berlin: BMWi.

¹⁸ Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE)

- BMWi; BMU (2015). *Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand*. Berlin.
- BReg (2021). *Bundes-Klimaschutzgesetz*.
- Brøgger, Morten; Wittchen, Kim Bjarne (2018). Estimating the energy-saving potential in national building stocks – A methodology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1489–1496.
- Busch, Roland; Müller, Ann-Katrin (2020). *Erhebungsmerkmale und Merkmalsausprägungen im Screening*. [ENOB:dataNWG Projektinfo 3]. Wuppertal: BUW.
- Buschka, Michael; Bischof, Julian; Meier-Dotzler, Christina; Lang, Werner (2021). Developing non-residential building stock archetypes for LCI—a German case study of office and administration buildings. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26.
- BVerfG (2021). *Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich*. [Pressemitteilung]. Karlsruhe: Bundesverfassungsgericht.
- Cischinsky, Holger (2021). *Stichprobe: Modellierung und Ziehung*. (ENOB:dataNWG Teilbericht Nummer E 1.4.5). Darmstadt: IWU.
- Corrado, Vincenzo; Mechri, Houcem Eddine (2009). Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating. *Journal of Building Physics*, 33 (2), 125–156.
- Deilmann, Clemens; Behnisch, Martin; Dirlich, Stefan; Gruhler, Karin; Hagemann, Ulrike; Petereit, Ralph; ... Petereit, Karin (2013). Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen. *BMVBS-Online-Publikation, Nr. 27/2013*.
- Eicke-Hennig, Werner; Siepe, Benedikt (1997). *Die Hessische Gebäudetypologie*. Darmstadt: IWU.
- EnEV 2016 (2015, Oktober 24). *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung—EnEV)—2015*. Bundes Gesetz Blatt 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789).
- Famuyibo, Adesoji Albert; Duffy, Aidan; Strachan, Paul (2012). Developing archetypes for domestic dwellings—An Irish case study. *Energy and Buildings*, 50, 150–157.
- Filogamo, Luana; Peri, Giorgia; Rizzo, Gianfranco; Giaccone, Antonino (2014). On the classification of large residential buildings stocks by sample typologies for energy planning purposes. *Applied Energy*, 135, 825–835.
- García Kerdan, Iván; Morillón Gálvez, David; Raslan, Rokia; Ruyssevelt, Paul (2015). Modelling the energy and exergy utilisation of the Mexican non-domestic sector: A study by climatic regions. *Energy Policy*, 77, 191–206.
- GEG2020 *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze—Vom 8. August 2020*, Pub. L. No. Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 37, § 1, 67 (2020).
- Gierga, M.; Erhorn, H. (1993). *Bestand und Typologie beheizter Nichtwohn- gebäude in Westdeutschland*. Stuttgart: IBP.
- Heo, Yeonsook (2011). *BAYESIAN CALIBRATION OF BUILDING ENERGY MODELS FOR ENERGY RETROFIT DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY*. PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology. Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Hjortling, Camilla; Björk, Folke; Berg, Magnus; Klintberg, Tord af (2017). Energy mapping of existing building stock in Sweden – Analysis of data from Energy Performance Certificates. *Energy and Buildings*, 153, 341–355.
- Hörner, Michael (2020). *Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude*. [ENOB:dataNWG Projektinfo 1]. Darmstadt: IWU.
- IEA-BEEP (2019). *Buildings Energy Efficiency Policies Database—Germany*. IEA.
- Klauß, Swen; Kirchhof, Wiebke; Gissel, Johanna (2009). *Erfassung regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten*.

- Klauß, Swen; Kirchhof, Wiebke; Maas, Anton (2010). *Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit*. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB).
- Kluge, Susann (2000). *Empirisch begründete Typenbildung in der qualitativen Sozialforschung*. Forum Qualitative Sozialforschung.
- Kretschmar, Daniel; Schiller, Georg; Weitkamp, Alexandra (2019). Nichtwohngebäude in Deutschland – Typisierung eines dynamischen Marktes. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, (3/2019), 157–166.
- Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus; Stein, Britta; Born, Rolf (2012). *TABULA - Scientific Report Germany: Further Development of the National Residential Building Typology*.
- Loga, Tobias; Großklos, Marc; Müller, André; Swiderek, Stefan; Behem, Guillaume (2021). *MOBASY Realbilanzierung: Verbrauch, Bedarf und Vergleich*. Darmstadt: IWU.
- Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus (2016). TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable. *Energy and Buildings*, 132, 4–12.
- Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf; Institut Wohnen und Umwelt (Hg.) (2015). *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - „Typology approach for building stock energy assessment“, EPISCOPE - „Energy performance indicator tracking schemes for the continous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks“*. 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU.
- Mastrucci, Alessio; Marvuglia, Antonino; Leopold, Ulrich; Benetto, Enrico (2017). Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 316–332.
- Mittner, P. (1992). *Kennwerte zur Charakterisierung und Bewertung des energetischen Zustandes und des Energieverbrauchs der Gebäude im Nichtwohnbereich*. Leipzig: Gesellschaft für wirtschaftliche Energienutzung.
- Niklasch, Werner; Veerkamp, Stefan (2014). *Wissenschaftliche Begleitung der Fortschreibung der amtlichen Bekanntmachungen der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung zur Erstellung von Energieausweisen*. BBSR-Online-Publikation.
- Olivero, Elisa; Onillon, Emmanuel; Beguery, Patrick; Brunet, Romain; Marat, Sophie; Azar, Marc (2016). *ON KEY PARAMETERS INFLUENCING BUILDING ENERGY PERFORMANCE*.
- Ortlepp, Regine; Gruhler, Karin; Schiller, Georg (2016). Materials in Germany’s domestic building stock: Calculation model and uncertainties. *Building Research & Information*, , 1–15.
- Philip, Sjoukje Y.; Kew, Sarah F.; van Oldenborgh, Geert Jan; Anslow, Faron S.; Seneviratne, Sonia I.; Vautard, Robert; ... Otto, Friederike E. L. (2021). *Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021*. [Preprint]. Earth system change: climate scenarios.
- Reinhart, Christoph F.; Cerezo Davila, Carlos (2016). Urban building energy modeling – A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202.
- Särndal, Carl-Erik; Swensson, Bengt; Wretman, Jan Håkan (2003). *Model assisted survey sampling*. 1. softcover print. New York Berlin Heidelberg: Springer.
- Scholten, Rebecca C.; Jandt, Randi; Miller, Eric A.; Rogers, Brendan M.; Veraverbeke, Sander (2021). Overwintering fires in boreal forests. *Nature*, 593 (7859), 399–404.
- Smith, Stefan Thor (2009). *Modelling thermal loads for a non-domestic building stock. Associating a priori probability with building form and construction—Using building control laws and regulations*. The University of Nottingham, Nottingham.
- Stein, Britta; Hörner, Michael (2015). *Typologie-gestützte Kennwerte für die energetische Bewertung bestehender Nichtwohngebäude*. Darmstadt: IWU.
- TABULA Project Team (Hg.) (2012). *Typology approaches for non-residential buildings in four European countries: Existing information, concepts and outlook*. Darmstadt: IWU, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt/Germany.

- Thiel, Dieter; Riedel, Dirk (2011). *Typisierte Bauteilbauten - Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand: Endbericht*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Tuominen, Pekka; Holopainen, Riikka; Eskola, Lari; Jokisalo, Juha; Airaksinen, Miimu (2014). Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. *Building and Environment*, 75, 153–160.
- UNEP; UCL; BPIE; IEA (2021). *2021 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION*. 105. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- WWA (2021). *Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021*. World Weather Attribution.