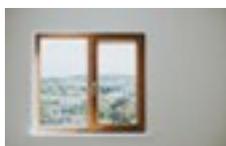


Graue Energie

**Studie zur Validierung des „Scope 3“ Moduls
für Immobilien**

Leonard Fister, Christian Kraft, Gianrico
Settembrini



Auftraggeber/in

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Klima, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation (UVEK).

Begleitung BAFU:

Silvia Ruprecht (Projektleitung), Gianna Battaglia, Roger Ramer,
Markus Wüest, Andrea Streit (BFE)

Zitiervorschlag

L. Fister, C. Kraft, G. Settembrini, Graue Energie, Studie zur
Validierung des «Scope 3» Moduls für Immobilien, IFZ, 2023.

Projektleitung

Dr. Leonard Fister, IFZ, HSLU – W
Prof. Dr. Christian Kraft, IFZ, HSLU – W
Gianrico Settembrini, IGE, HSLU – T&A

Kontakt für Rückfragen

Hochschule Luzern

Wirtschaft

Dr. Leonard Fister
Campus Zug-Rotkreuz
Suurstoffi 1
6343 Rotkreuz

+41 41 757 67 84
leonard.fister@hslu.ch

www.hslu.ch/de-ch/wirtschaft/institute/ifz/immobilien/



hslu.ch/Wirtschaft

© 02.2024, Hochschule Luzern – Wirtschaft

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt
(BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer
verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	5
2	Einleitung	7
3	Datengrundlage	9
3.1	Baueingabedaten	9
3.1.1	Datenbeschreibung Baueingabedaten	9
3.1.2	Stichprobenbeschreibung	9
3.1.3	Datenaufbereitung Baueingabedaten	10
3.2	KBOB-Ökobilanzdaten	11
3.2.1	Datenbeschreibung KBOB-Ökobilanzdaten	11
3.2.2	Datenaufbereitung KBOB-Ökobilanzdaten	12
4	Methodik	13
4.1	Gebäudemodell	13
4.1.1	Kubatur und Gebäudeform	14
4.1.2	Gebäudetechnik	15
4.1.3	Gebäudematerialisierung	15
4.2	Gebäudekomponenten nach Norm SIA 2032	16
4.2.1	Übersicht der Elementgruppen	17
4.2.2	Dimensionierung der Gebäudekomponenten	17
4.3	Anwendung KBOB-Ökobilanzdaten gemäss SIA 2032:2020	19
5	Modellresultate	20
5.1	Ergebnisse Detailmodell	20
5.2	Vergleich aus Detailmodell und Referenzgebäude	23
5.3	Ergebnisse und Vergleich mit Grobmodell	24
5.4	Sensitivitäten	27
5.4.1	Gebäudekubatur	27
5.4.2	Materialisierung und Dämmung	28
5.4.3	Photovoltaik und Erdwärme	31
6	Validierung PACTA-Modul	33

6.1	Stichprobenbeschreibung	33
6.2	Kurzbeschreibung PACTA-Modul	34
6.3	Unterschiede PACTA Scope 3 Modul und Validierungsmodell	34
6.4	Vergleich PACTA-Modul und Detailschätzung	35
6.4.1	Zusammenfassung Modellanwendung und Validierungsergebnisse	35
6.4.2	Abweichungen nach Bauteilen	36
7	Schlussfolgerungen	42
8	Verzeichnisse	44
9	Literaturverzeichnis	47
10	Anhang	48
10.1	Datenaufbereitung Baueingabedaten	48
10.1.1	Datenbeschreibung Baueingabedaten	48
10.1.2	Variablenaufbereitung Baueingabedaten	49
10.1.3	Datenqualitätsbereinigung	52
10.2	Gebäudemodell	52
10.2.1	Kubatur und Gebäudeform	52
10.3	Dimensionierung der Bauelemente nach SIA 2032:2020	56
10.3.1	Vorarbeiten	56
10.3.2	Gebäudehülle unter Terrain	57
10.3.3	Gebäudehülle über Terrain	58
10.3.4	Innen- und Aussenbauteile	59
10.3.5	Gebäudetechnik	60
10.4	Anwendung KBOB-Ökobilanzdaten	62
10.5	Sensitivitätsanalyse Stockwerksfläche	65

1 Management Summary

Das vorliegende Projekt wurde durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert und widmet sich der Modellierung von Grauer Energie, insbesondere von grauen Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Transport und Entsorgung von Gebäuden im Kontext nachhaltiger Bauprojekte. Der Fokus liegt dabei auf der Validierung des Scope 3 Moduls für Immobilien- und Hypothekarportfolios, welches im PACTA Klimatest 2024 des BAFU für alle Schweizer Banken, Pensionskassen, Versicherungen und Vermögensverwaltenden erstmalig zur Anwendung kommt.¹

Die Untersuchung ergab, dass hauptsächlich die Gebäudekubatur und damit einhergehend die Menge der verbauten Materialien massgebend sind für die Werte an grauen Treibhausgasemissionen von Gebäuden hinsichtlich Erstellung, Transport und Entsorgung. Die Skalierung mit der Gebäudegrösse ist fast linear, wobei leichte Effizienzgewinne durch grössere Gebäudevolumina bis zu einem moderaten Niveau erreicht werden können. Für sehr grosse Gebäude werden die Effizienzgewinne durch die Notwendigkeit einer stärkeren Tragekonstruktion reduziert. Die Wahl der Materialien hat einen Einfluss im Bereich von +/- 20% und erlaubt eine Optimierung der grauen Treibhausgasemissionen in dieser Grössenordnung. Demzufolge können vor allem Strategien, die auf Sanierung und Wiederverwendung bestehender Substanzen beruhen, einen sehr wichtigen Beitrag zur Reduktion von grauen Treibhausgasemissionen und deren Umweltauswirkungen von Bauprojekten leisten.

Die Resultate beruhen auf einer Analyse aller Neubauten für Wohngebäude der Jahre 2009 bis Februar 2023, für welche aus den Baueingabedaten Detailinformationen zu Gebäudeform und den verbauten Materialien vorhanden sind. Für die vorliegenden Angaben wird die Norm SIA 2032:2020 (SIA, 2020) bzw. die darin referenzierten KBOB-Ökobilanzdaten (KBOB, 2023) angewendet. Speziell in dem betrachteten Zeitraum gewann der Einbezug der grauen Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Transport und Entsorgung für eine gesamtheitliche Bilanzierung eines Gebäudes an Bedeutung, da vermehrt erneuerbare anstelle von fossilen Heizsysteme verbaut wurden. Die Reduktion der Emissionen im Betrieb führt dazu, dass die jährlichen Emissionen aus Erstellung, Transport und Entsorgung während des Zeitraums der angenommenen Nutzungsdauer eines Gebäudes in der gleichen Grössenordnung liegen wie jene aus dem Betrieb. Für die Netto-Null Zielerreichung bis 2050, wie dies mit dem Klima- und Innovationsgesetz angestrebt wird (UVEK, 2023), wird somit der Miteinbezug der grauen Treibhausgasemissionen immer wichtiger, insbesondere bei Neubauten und bei bestehenden Bauten, sobald ein Entscheid zwischen Sanierung und Abriss ansteht.

Die Erkenntnisse und Resultate der Studie wurden mit jenen aus dem erweiterten PACTA-Immobilienmodell für Scope 3 Emissionen aus Baumaterialien im Zuge einer Modellvalidierung verglichen. Die beiden Modelle stimmen qualitativ und quantitativ mit hoher Präzision überein. Geringfügige Abweichungen werden durch unterschiedliche Datengrundlagen zu den Gebäuden erklärt, da die Baueingabedaten detailliertere Informationen zu Bauform und Materialien der Gebäude liefern. Insgesamt bekräftigt die Studie somit, dass die Erweiterung

¹ Siehe auch www.bafu.admin.ch/klima-finanzmarkt

des PACTA-Immobilienmodells zu den „Scope 3 Emissionen aus Baumaterialien“ eine robuste Schätzung der Grauen Energie aus Erstellung, Transport und Entsorgung eines Gebäudes erlaubt.

2 Einleitung

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) führt in Zusammenarbeit mit dem Staatssekretariat für internationale Finanzen (SIF) alle zwei Jahre einen Klimatest für Finanzmarktakteure durch. Seit 2020 werden in dieser Studie auch Emissionen aus Immobilien- und Hypothekarportfolien mit einbezogen, wobei der Fokus bislang auf den Emissionen im Betrieb (Scope 1) lag, welche über den CO₂-Rechner im PACTA-Immobilienmodul berechnet werden. Für die Durchführung des Klimatests im Jahr 2024 ist eine Erweiterung der Betrachtung der Treibhausgasemissionen hinsichtlich der Emissionen aus Strom (Scope 2) und Baumaterialien (Scope 3), nebst einer Verbesserung des Scope 1 Modells, geplant. Die hierfür notwendige Erweiterung des Modells wird im Auftrag des BAFU durch die Firma Fahrländer Partner AG (FPRE) ausgeführt. Da die Modellierung von Scope 3 Emissionen jedoch herausfordernd ist, hat das BAFU eine zusätzliche Studie zur unabhängigen Validierung des Modells zum gleichen Scope durch die Hochschule Luzern beauftragt.

Die vorliegende Studie fasst die Resultate der Validierung zusammen. Hierfür wurde seitens der Hochschule Luzern ein unabhängiges Modell zur Berechnung der Scope 3 Emissionen erstellt, welches auf der Norm SIA 2032:2020 (SIA, 2020) und den KBOB-Ökobilanzdaten (KBOB, 2023) beruht, die auf der Stufe einzelner Gebäude angewendet werden. Betrachtet werden alle Neubauten zur ausschliesslichen Wohnnutzung aus dem Zeitraum von Januar 2009 bis Februar 2023, da der Hochschule Luzern seitens der Firma Docu Media Schweiz GmbH detaillierte Informationen zu den Gebäuden zur Verfügung gestellt wurden. Diese Daten wurden seitens der Datenlieferantin systematisch anhand des Baublatts erhoben und manuell qualitätsbereinigt. Die enthaltenen Informationen umfassen Angaben zur Dimensionierung, dem Ausbau und der Materialisierung einzelner Komponenten der Gebäude.

Anhand der Validierung werden Funktionalität und Präzision des neu entwickelten PACTA-Moduls für Scope 3 geprüft, insbesondere die Diskriminierungskraft des Modells bei Vorliegen von Detailinformationen. Das PACTA-Modul zu Scope 3 beruht auf selbst eingegebenen oder – falls solche z.B. bei Hypothekenportfolien nicht vorhanden sind – öffentlich verfügbaren Informationen über Gebäude, welche wiederum lediglich eine Schätzung der Gebäudekubatur zulassen, jedoch keine Materialisierung enthalten.² Optional können Teilnehmende des Klimatests weitere Details zum Gebäude in das Modell einfließen lassen. Da diese Informationen jedoch oft nicht bekannt sind, respektive deren Erhebung zu einem prohibitiv grossen Aufwand führen würde, soll die Validierung die Güte des PACTA-Immobilienmodells unter der Anwendung öffentlich verfügbarer Informationen gegenüber dem Validierungsmodell untersuchen. Diese Analyse beruht auf einer Stichprobe von Gebäuden, für welche auf der Ebene einzelner Bauelemente die grauen Treibhausgasemissionen zwischen den Modellen verglichen und anhand von den Abweichungen zwischen den Modellen die Einflüsse von Baumaterialien bestimmt werden.

Die vorliegende Studie bietet zudem Sensitivitätsanalysen der Menge an grauen Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Transport und Entsorgung bezüglich einzelner

² Dabei werden die energierelevanten Daten aus dem Eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister GWR beigezogen (BFS, 2023).

Gebäudekomponenten bzw. Materialien und den Vergleich mit einem Referenzgebäude, für welches die grauen Treibhausgasemissionen detailliert vorliegen.

Die Studie beschreibt in Abschnitt 3 die Datengrundlage für die Modellentwicklung und Validierung. In Abschnitt 4 wird das entwickelte Validierungsmodell zu Scope 3 Emissionen beschrieben. Abschnitt 5 fasst die Modellresultate für die Anwendung auf alle Neubauten zu Wohnzwecken des betrachteten Zeitraums zusammen und analysiert den Einfluss der Materialisierung im Vergleich mit dem reduzierten Modell über Sensitivitätsanalysen. Zudem erfolgt der Vergleich mit den modellunabhängig bestimmten grauen Treibhausgasemissionen eines Referenzgebäudes. Abschnitt 6 enthält die Resultate der Validierung des PACTA-Moduls, sowohl über die auf Gebäude aggregierten grauen Treibhausgasemissionen als auch über den granularen Vergleich auf Stufe einzelner Bauelemente. Abschnitt 7 fasst die Erkenntnisse der Studie zusammen.

3 Datengrundlage

Das nachfolgend beschriebene Modell beruht ausschliesslich auf den Daten aus Baueingaben und KBOB-Ökobilanzdaten. Die Datengrundlage wird in den folgenden Abschnitten weiter ausgeführt.

3.1 Baueingabedaten

3.1.1 Datenbeschreibung Baueingabedaten

Die Daten zu den Baueingaben wurden durch das Bauinfo-Center von Docu Media GmbH aus dem Baublatt und firmeneigenen Recherchen erhoben und für dieses Projekt zur Verfügung gestellt.

Der Datensatz ist eine Vollerhebung aller Schweizer Baueingaben mit Baubewilligung im Zeitraum von 1. Januar 2009 bis 21. Februar 2023 und enthält sehr detaillierte Informationen zum Eingabe- und Bewilligungsablauf, der Bauherrschaft und den Projektplanern, sowie zu den Bauprojekten in Bezug auf den Typ der Bautätigkeit, die Lage, Nutzung, Form, Ausbau und Materialisierung einzelner Gebäudekomponenten des Bauobjekts.

Da die zur Verfügung stehenden Daten sehr umfangreich sind, wird die Darstellung auf jene Attribute, die für das aktuelle Projekt relevant sind, reduziert. Die verwendeten Informationen umfassen die Art des Bauprojekts (z.B. Neubau), das Datum der Baubewilligung, die Projektkosten (in CHF), das Projektvolumen (in m³), die Geschossfläche, die Stockwerksanzahl im Gebäude, den Gebäudetyp (EFH, MFH, Mischnutzung), die Dachform, zusätzliche Bauten (z.B. Balkone, Tiefgaragen und Aussenparkplätze), spezielle technische Anlagen (Photovoltaik, Erdwärme, Lüftung), die Dämmungsstufe und die Materialisierungen von Tragekonstruktion, Fassade, Dach, Decken und Böden. Weitere Details zur Verfügbarkeit von Detailinformationen und deren Verwendung im Modell sind dem Abschnitt 3.1.3 bzw. dem Anhang 10.1.1 zu entnehmen.

3.1.2 Stichprobenbeschreibung

Für das aktuelle Projekt werden ausschliesslich Neubauten zur reinen Wohnnutzung berücksichtigt, für die eine Baubewilligung vorliegt. Die zur Identifikation und Reduktion des Datensatzes angewendeten Filter werden in Abschnitt 3.1.3 beschrieben.

Die Stichprobengrösse beträgt 111'355 Bauprojekte. Darin enthalten sind jeweils 79'901 Einfamilienhausprojekte (EFH), 29'167 Mehrfamilienhausprojekte (MFH) und 2'287 Projekte mit sowohl EFH als auch MFH Gebäuden. Wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben, wird der Datensatz einer weiteren Qualitätsbereinigung unterzogen, um Interpretations- und Eingabefehler wie unrealistisch grosse oder kleine Gebäudevolumina oder Stockwerksanzahlen auszuschliessen.

3.1.3 Datenaufbereitung Baueingabedaten

3.1.3.1 Stichprobenkonstruktion

In einem ersten Schritt werden die Baueingabedaten hinsichtlich Eingabefeldern in den Kalenderdaten zu Baueingaben und Baubewilligungen qualitätsbereinigt. Dabei werden Bauprojekte entfernt, deren Kalenderdaten nicht dem zeitlichen Umfang des Datensatzes entsprechen.

In einem zweiten Schritt werden nur Bauprojekte berücksichtigt, die ausschliesslich zum Zweck der Wohnnutzung konstruiert werden. Diese umfassen Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser zur reinen Wohnnutzung. Bauprojekte, die zusätzlich zu diesen Gebäudetypen noch weitere Bauten enthalten, werden ausgeschlossen. Weitere Details zu den Gebäudetypen können Anhang 10.1.2.1 entnommen werden.

Zur Verbesserung der Datenqualität in der Stichprobe werden nach Aufbereitung der Rohdaten weitere Filter angewendet, siehe Abschnitt 3.1.3.3.

3.1.3.2 Variablenaufbereitung

3.1.3.2.1 Gebäudetyp und -nutzung

Bauprojekte der Baueingabedaten werden nach Gebäudetyp und -nutzung unterschieden. Projekte können mehr als ein Gebäude enthalten. Die drei betrachteten Kategorien sind Einfamilienhausprojekte (alle Gebäude sind Einfamilienhäuser), Mehrfamilienhausprojekte (alle Gebäude sind Mehrfamilienhäuser) und gemischte Projekte (Projekte enthalten sowohl Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser). Weitere Details zur Kategorisierung sind im Anhang 10.1.2.1 ausgeführt.

3.1.3.2.2 Gebäudedimensionierung

Das Projektvolumen (in m³) eines Bauprojekts wird den Baueingabedaten entnommen. Dieses umfasst alle Gebäude im Projekt. Auf Basis des Volumens erfolgt die Dimensionierung des Gebäudemodells. Die Stockwerksanzahl ist ebenfalls aus den Baueingabedaten bekannt. Geschossflächen werden unter der Annahme einer Stockwerkshöhe von 3 m aus dem Volumen geschätzt. Fehlende Angaben in den Baueingabedaten werden durch Ersatzwerte behandelt. Die Dimensionierung wird in Anhang 10.1.2.2 weiter ausgeführt.

3.1.3.2.3 Bauform und Ausführung

Baueingabedaten enthalten Angaben zur Bauform und Ausführung eines Projekts. Insbesondere werden Informationen zu Dachform, Aussenparkplätzen, Tiefgaragen, Lüftungsanlagen, Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen berücksichtigt. Für die Identifikation der Informationen und Parametrisierung im Modell siehe Anhang 10.1.2.3.

3.1.3.2.4 Dämmung und Materialisierung

Informationen über das Vorhandensein einer Gebäudedämmung und zu den verbauten Materialien nach Bauelement sind in den Baueingabedaten vorhanden. Die Angaben zu Materialien umfassen die Tragekonstruktion, die Fassade, das Dach, Böden und Decken. Die verfügbaren Daten erlauben die Identifikation eines Baumaterials, jedoch nicht dessen

verwendeten Anteil im Bauelement. Das Modell trifft daher die Annahme, dass im Falle einer mehrfachen Materialspezifikation, die jeweiligen Materialien zu gleichen Anteilen verbaut sind. Weitere Details können Anhang 10.1.2.4 entnommen werden.

3.1.3.3 Datenqualitätsbereinigung

Die Stichprobe wird abschliessend weiter eingeschränkt, um die Datenqualität in Bezug auf Eingabefehler in den Rohdaten zu erhöhen. Die verwendeten Filter beziehen sich auf die maximale Anzahl der Stockwerke eines Gebäudes und den minimalen respektive maximalen Flächenverbrauch. Details sind in Anhang 10.1.3 gegeben.

3.1.3.4 Stichprobengrösse

Nach Anwendung der Datenaufbereitung und Datenqualitätsbereinigung ergibt sich eine Stichprobe für Neubauten zur ausschliesslichen Wohnnutzung von insgesamt 110'010 Bauprojekten. Dabei handelt es sich um 60'150 EFH-Projekte mit einem einzelnen Gebäude, 19'455 EFH-Projekte mit mehr als einem Gebäude, 28'254 MFH-Projekte und 2'151 gemischte Projekte.

3.2 KBOB-Ökobilanzdaten

3.2.1 Datenbeschreibung KBOB-Ökobilanzdaten

Die Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB), ecobau und IPB veröffentlichen gemeinsam Ökobilanzdaten im Baubereich und ergänzen die Betrachtung aus Scope 1 und Scope 2 im Sinne einer gesamtheitlichen Betrachtung eines Gebäudes gemäss Erstellung, Transport der Materialien, Betrieb und Entsorgung³. Die Werte basieren auf Stoff- und Energieflüssen, welche hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz bewertet werden. Die Ökobilanz eines Gebäudes kann damit zu grossen Teilen mittels der von KBOB, ecobau und IPB herausgegebenen Ökobilanzdaten im Baubereich zu Baumaterialien, Gebäudetechnik, Energiebereitstellung, Transporten und Entsorgungsprozessen ermittelt werden (KBOB, 2023), insbesondere in Bezug auf die separat ausgewiesenen Mengen an grauen Treibhausgasemission bzw. nicht-erneuerbarer Primärenergie. Datenstand für die aktuelle Studie sind die KBOB-Ökobilanzdaten gemäss 20. Juli 2023. Zukünftige Weiterentwicklungen der KBOB-Datenbank werden es erlauben, die Scope 3 Emissionen vollständiger und auch differenzierter zu erfassen, z.B. durch die Erweiterung der Datenbank auf selten angewendete Baustoffe (z.B. Lehm, Hanfdämmung) oder hinsichtlich des Potenzials zur Speicherung von CO₂ etwa bei Holz. Aktuell lässt die Datenbank keine Auswertung nach Gebäudegrösse zu, was insbesondere für die Verstärkung von tragenden Strukturen für grosse Gebäude relevant ist.

Bereits jetzt erlauben die KBOB-Ökobilanzdaten jedoch eine sehr granulare Bewertung einzelner Bauelemente und Baumaterialien anhand von Werten für graue Treibhausgasemissionen (gTHG-E) und nicht-erneuerbare Primärenergie (PEne). Hierbei wird nach Baumaterialien, Gebäudetechnik, Energie, Transport und Entsorgung unterschieden.

³ Die KBOB-Ökobilanzdaten beschreiben die Graue Energie nicht vollständig, da z.B. Baustellenmitarbeitertransport und Teile der Baustellenemissionen nicht abgedeckt sind. Gemäss Schätzung liegt die Gesamtbilanz der Grauen Energie um 10-30 Prozent höher als in den KBOB-Ökobilanzdaten ausgewiesen.

Somit lassen sich gTHG-E und PEne eines gesamten Gebäudes in Bezug auf Scope 3 durch eine Aggregation von Einzelementen und Prozessstufen von Grund auf berechnen. Deren Beiträge ergänzen jene aus Scope 1 und Scope 2 zur gesamtheitlichen Betrachtung eines Gebäudes gemäss Erstellung, Transport der Materialien, Betrieb und Entsorgung.

3.2.2 Datenaufbereitung KBOB-Ökobilanzdaten

Die Grundlage für die Bestimmung der gTHG-E und PEne eines Gebäudes bildet die Norm SIA 2032:2020 (SIA, 2020), für welche die KBOB-Ökobilanzdaten Anwendung auf Dimensionierung der Bauelemente gemäss Vorprojektphase finden. Die Berechnungsgrundlage ist über energytools.ch als Anhand D zu SIA 2032 verfügbar (energytools, 2020). Der Datenstand dieser Quelle bezüglich KBOB-Ökobilanzdaten war zum Zeitpunkt der Studie nicht aktuell. Daher wurden die Inputdaten für die Berechnungsgrundlage durch die KBOB-Ökobilanzdaten gemäss der aktuellen Version 3 vom 20. Juli 2023 ersetzt und die daraus erlangten Werte im Modell angewendet, siehe Abschnitt 4.3.

4 Methodik

Das Modell erfolgt durch die Anwendung der SIA Norm 2032:2020 und der KBOB-Ökobilanzdaten. Diese werden auf das Gebäudemodell angewendet, das auf der Datenbasis der Baueingabedaten konstruiert wird. Aus dem Gebäudemodell werden Bauteil- und Energiebezugsflächen, respektive Dimensionierungen zu Vorarbeiten der Bauphase abgeleitet. Zusätzlich werden den Baueingaben Informationen zur Bauform, Gebäudeausstattung und Baumaterialien entnommen.

In Abschnitt 4.1 wird die Konstruktion des Gebäudemodells anhand von Baueingabedaten beschrieben. Die Zerlegung in Gebäudekomponenten gemäss SIA 2032:2020 erfolgt in Abschnitt 4.2, die Anwendung KBOB-Ökobilanzdaten in Abschnitt 4.3. Technische Details finden sich in Anhängen 10.2 bis 10.4.

4.1 Gebäudemodell

Zur Berechnung der Grauen Energie anhand der Norm SIA 2032:2020 müssen Bauteil-, Energiebezugsflächen, Aushubvolumina sowie die verwendeten Materialien bekannt sein. Das Gebäudemodell hat zum Ziel, die Dimensionierungen und Materialien dieser Elemente anhand der vorhandenen Baueingabeinformationen möglichst genau zu bestimmen.

Das Gebäudemodell beruht auf Baueingabedaten für Neubauten aus dem Zeitraum Januar 2009 bis Februar 2023. Für diese Stichprobe leitet das Gebäudemodell in einem ersten Schritt die Kubatur ab, die das Gebäudevolumen, die Anzahl der Stockwerke unter und über Terrain, die Stockwerksflächen sowie das Vorhandensein einer Tiefgarage bzw. deren Volumen und Fläche umfasst. Des Weiteren wird die Dachform den Baueingabedaten entnommen. In Kombination mit der Vorprojektphase gemäss SIA 2032:2020 (SIA, 2020) erlaubt dies die Schätzung der Bauteilflächen eines Gebäudes. In einem zweiten Schritt werden aus den Baueingabedaten Zusatzinformationen zu Ausbaustandard, Bauform und Materialisierung des Gebäudes betrachtet. Insbesondere werden gemäss Spezifikation das verbaute Material in Tragekonstruktion, Fassade, Dach, das Vorliegen einer Gebäudedämmung und das Vorhandensein von Balkonen bzw. Lüftungs-, Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen berücksichtigt. Dies erlaubt eine Präzisierung der verbauten Materialmengen und der gebäudetechnischen Anlagen.

Aufgrund der teils unvollständigen Datenlage müssen Annahmen für Ersatzwerte zu Kubatur, Gebäudeform und typischen Bauformen und Materialisierungen getroffen werden. Diese Annahmen wurden anhand von Erfahrungswerten des Departements Technik und Architektur der Hochschule Luzern bestimmt.

4.1.1 Kubatur und Gebäudeform

4.1.1.1 Gebäudemultiplizität in Baueingabeprojekten

Das Gebäudemodell beruht im ersten Schritt auf einer Schätzung der Kubatur der Gebäude eines Bauprojekts anhand von Baueingabedaten zu Dimensionierung, insbesondere Volumen, Geschossfläche und Stockwerksanzahl. Für Projekte mit mehr als einem Gebäude erfolgt eine Disaggregation von Projektstufe auf Gebäudestufe, um die Granularitätsstufe zwischen Validierungsmodell und PACTA-Scope 3 Modell zu harmonisieren. Hierbei werden Einfamilienhaussiedlungen als separate Gebäude betrachtet und über die Gebäudemultiplizität im Bauprojekt berücksichtigt. Mehrfamilienhausprojekte werden per Annahme immer als einzelne Bauten betrachtet, da aufgrund der Datenlage nicht weiter unterschieden werden kann. Für weitere Details siehe Anhang 10.2.1.1.

4.1.1.2 Gebäudedimensionierung

4.1.1.2.1 Gebäude- und Tiefgaragenvolumen

Das Gebäudevolumen (in m³) eines Bauprojekts kann den Baueingabedaten entnommen werden und dient als Berechnungsgrundlage für die Gebäudekubatur und -fläche. Da das Volumen auch Tiefgaragenbeiträge enthält, werden zunächst diese Anteile aus dem Volumen exkludiert. Für Gebäude mit Tiefgaragen werden somit jene Anteile geschätzt, welche sich auf das Wohngebäude respektive die Tiefgarage beziehen. Für Details zum Schätzverfahren siehe 10.2.1.2. Für einzelne Einfamilienhäuser wird der Tiefgarage ein zusätzliches Volumen von 25% des Gebäudevolumens beigemessen. Bei Einfamilienhaussiedlungen erfolgt die Modellannahme, dass die Tiefgarage von allen Gebäuden geteilt wird. Es werden 25% des aggregierten Volumens aller Gebäude veranschlagt. Bei Mehrfamilienhäusern ist das zusätzliche Volumen aufgrund der Notwendigkeit grösserer Zufahrten und Verkehrsflächen erhöht und wird mit 50% des Gebäudevolumens budgetiert. Bei Vorhandensein eines Aussenparkplatzes jedoch wird nur die Hälfte des Volumens angerechnet. Für alle Nutzungstypen werden Tiefgaragen als separate Bauten unter Terrain betrachtet, die vollständig von einem unterirdischen Dach überdeckt werden.

4.1.1.2.2 Stockwerksanzahl

Die Anzahl der Stockwerke über Terrain ist aus den Baueingabedaten ersichtlich. Für die Stockwerksanzahl unter Terrain wird 1 Untergeschoss für Gebäude bis 4 Geschossen über Terrain, bzw. 2 Untergeschosse für Gebäude mit 5 oder mehr Geschossen angenommen. Für weitere Details siehe Anhang 10.2.1.4.

4.1.1.2.3 Geschossfläche

Die Geschossfläche wird über das Projektvolumen und der Annahme einer Stockwerkshöhe von 3 m bestimmt. Die Geschossfläche wird zu gleichen Teilen über die Geschosse über und unter Terrain aufgeteilt. Zudem wird die Fläche eines Stockwerks berechnet. Die Energiebezugsfläche wird über die Flächen der Stockwerke über Terrain bestimmt. Für weitere Details siehe Anhang 10.2.1.5.

4.1.1.2.4 *Gebäudegrundrissform*

Um die Bauteilflächen von Aussenwandelementen zu bestimmen, bedarf es einer Umrechnung von der Geschossfläche auf die Form des Grundrisses. Die Baueingabedaten lassen hier keine Rückschlüsse zu und folglich müssen Annahmen getroffen, welche von einer rechteckigen Form im Seitenverhältnis 2:1 bzw. für grosse und sehr grosse Gebäude 3:1 und 4:1 ausgehen, siehe Anhang 10.2.1.6 für Details.

4.1.1.3 Fensterflächen

Fensterflächenanteile hängen von der Bauperiode ab und liegen für ältere Gebäude durchschnittlich im Bereich von 20%, für neuere Gebäude im Bereich von 35% der Fassadenfläche über Terrain. Da es sich in der Stichprobe ausschliesslich um Gebäude zwischen 2009-2023 handelt, wird ein Fensterflächenanteil von 35% im Gebäudemodell angewendet, siehe Anhang 10.3.3.

4.1.1.4 Balkone

Das Vorhandensein von Balkonen wird anhand der Baueingabedaten bestimmt. Da keine detaillierteren Angaben zur Verfügung stehen, wird eine Balkonfläche von 7 m² pro Wohneinheit angenommen.

4.1.2 Gebäudetechnik

Das Vorhandensein gebäudetechnischer Anlagen wird anhand der Baueingabedaten identifiziert. Gemäss SIA 2032 wird zwischen Elektro-, Wärme-, Lüftungs-, Wasser-, Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen unterschieden.

Da die Stichprobe ausschliesslich Wohngebäude umfasst, sind Elektro-, Wasser- und Wärmeanlagen in allen Projekten verbaut. Die Identifizierung von Lüftungs-, Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen erfolgt anhand von Indikatoren, siehe Anhang 10.1. Photovoltaische Anlagen werden hierbei ausschliesslich der Elektroanlage zugerechnet.

Mit Ausnahme der photovoltaischen Anlagen werden alle gebäudetechnischen Anlagen auf die gesamte Energiebezugsfläche, siehe Abschnitt 4.2.2.5, angerechnet. Die Leistung und Grösse der Photovoltaikinstallation werden gemäss der Dachform unterschieden, siehe Abschnitt 3.1.3.2.2.

4.1.3 Gebäudematerialisierung

Die Baueingabedaten enthalten Informationen zur Materialisierung der einzelnen Gebäudekomponenten in Form von Indikatorvariablen, siehe Anhang 10.1.1. Die Flächen und Volumina der Anteile der verschiedenen Materialien sind hingegen nicht ersichtlich und müssen über Annahmen im Modell berücksichtigt werden. Das Gebäudemodell unterscheidet zwischen den Indikatoren für die jeweilige Gebäudekomponenten in der Anwendung.

Die folgenden Abschnitte listen die jeweiligen Materialien und deren Berücksichtigung auf. Falls eine Komponente eine eindeutige Materialisierung aufweist, wird diese vollständig angerechnet. Bei Vorhandensein mehrerer Materialien in einem Gebäudeelement werden die

Materialien zu gleichen Anteilen der jeweiligen Komponente zugerechnet. Im Falle fehlender Materialisierung wird eine für den Schweizer Wohngebäudebestand typische Materialmischung als Ersatzwert angewendet. Die Ersatzwerte werden in Abschnitt 4.3 beschrieben.

4.1.3.1 Dämmung

Bei Vorhandensein des Dämmungsindikators wird die Annahme getroffen, dass das Gebäude in allen relevanten Komponenten (Fundament, Aussenwände, Dachhaut) gedämmt ist, siehe Abschnitt 3.1.3.2.4. Tiefgaragen werden immer als ungedämmt betrachtet.

4.1.3.2 Aussenwandkonstruktion

Die Aussenwandkonstruktion wird nach den Materialien SIA 2032 Norm unterschieden, darunter Betonwand, Backsteinwand, Holzwand, Einsteinmauerwerk und Stützraster gemäss den Indikatoren aus Abschnitt 3.1.3.2.4.

4.1.3.3 Aussenwandbekleidung

Die Aussenwandbekleidung wird nach den Materialien der SIA 2032 Norm, darunter äussere Beschichtung/Putz, Holzbekleidung, verputzte Aussenwärmedämmung, Metall/Glas und Faserzement/Naturstein gemäss Abschnitt 3.1.3.2.4 unterschieden.

4.1.3.4 Dachkonstruktion

Bei Vorhandensein des Indikators für eine Holzbauweise des Dachs wird die Dachkonstruktion vollständig als Holz berechnet, siehe Abschnitt 3.1.3.2.4.

4.1.3.5 Geschossdecken

Bei Vorhandensein des Indikators für eine Holzbauweise Decken werden Geschossdecken vollständig als Holz berechnet, siehe Abschnitt 3.1.3.2.4.

4.1.3.6 Böden

Böden werden als Unterkonstruktion mit Bodenbelag berechnet, da die Indikatoren hier zugleich den Ersatzwerten entsprechen.

4.2 Gebäudekomponenten nach Norm SIA 2032

Die Norm SIA 2032:2020 bietet eine Berechnungsgrundlage für die Mengen an grauen Treibhausgasemissionen und der nicht-erneuerbaren Primärenergie in Erstellung, Transport und Entsorgung eines Gebäudes anhand dessen Einzelkomponenten. Mithilfe der Dimensionierung der jeweiligen Bauteile und deren Materialisierung erlaubt die Norm in Kombination mit den KBOB-Ökobilanzdaten eine Berechnung der jeweiligen Mengen an grauen Treibhausgasemissionen bzw. nicht-erneuerbarer Primärenergie eines Gebäudes. In diesem Abschnitt werden anhand des in Abschnitt 4.1 beschriebenen Gebäudemodells die Elementgruppen besagter Norm für die Gebäude der Stichprobe identifiziert und dimensioniert. Die Anwendung der KBOB-Ökobilanzdaten für die jeweiligen Komponenten erfolgt in Abschnitt 4.3.

4.2.1 Übersicht der Elementgruppen

Die Norm SIA 2032:2020 unterscheidet die Elementgruppen gemäss Tabelle 1, inklusive der notwendigen Vorarbeiten.

Gebäudeteil	Elementbezeichnung	Bezugsgrösse ^{A)}	Einheit
Vorarbeiten	Aushub	Volumen	m ³
	Baugrubenabschluss	BTF	m ²
	Pfählung	BTF	m ²
Gebäudehülle unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	BTF	m ²
	Aussenwand	BTF	m ²
	Dach	BTF	m ²
Gebäudehülle über Terrain	Aussenwand	BTF	m ²
	Untersichten	BTF	m ²
	Fenster, Türen	BTF	m ²
	Dach	BTF	m ²
Innen- und Aussenbauteile	Innenwände	BTF	m ²
	Geschossdecken	BTF	m ²
	Aussen liegende Konstruktion, Vordach	BTF	m ²
Gebäudetechnik	Elektroanlage	EBF	m ²
	Wärmetechnische Anlagen	EBF	m ²
	Lufttechnische Anlagen	EBF	m ²
	Wassertechnische Anlagen	EBF	m ²

^{A)} BTF ... Bauteilfläche, EBF ... Energiebezugsfläche

Tabelle 1: Gebäudestruktur gemäss Norm SIA 2032:2020.

4.2.2 Dimensionierung der Gebäudekomponenten

Die Dimensionierung der Gebäudekomponenten erfolgt gemäss den Annahmen aus der Norm SIA 2032:2020 in der Vorprojektphase und den Annahmen aus dem Gebäudemodell in Abschnitt 4.1.

Bezüglich Vorarbeiten und Bauelementen unter Terrain berechnet das Modell Tiefgaragen aufgrund deren unterschiedlicher Materialisierungs- und Dämmungsannahmen separat. Eine Aggregation der Beiträge der Grauen Energie der einzelnen Beiträge aus Gebäude und Tiefgarage erfolgt im Modell lediglich zum Ausweisen der Totalbilanz.

4.2.2.1 Vorarbeiten

Die Vorarbeiten umfassen Aushub, Baugrubensicherung und Pfählung, welche gemäss Vorprojektphase der Norm SIA 2032:2020 dimensioniert werden. Der Aushub (in m³) umfasst hierbei das Volumen der Geschosse unter Terrain und der Tiefgarage. Die Baugrubensicherung wird anhand der unterirdischen Aussenwandflächen bemessen. Die Eingangsdaten enthalten keine Details zu einer Pfählung, daher wird nur bei mittelgrossen und grossen Gebäude eine anteilige Pfählung im Modell angenommen. Für Details zur Dimensionierung der Bauelemente aus den Vorarbeiten siehe Anhang 10.3.1.

4.2.2.2 Gebäudehülle unter Terrain

Die Gebäudehülle unter Terrain umfasst Fundament, Bodenplatte, Aussenwand und Dach unter Terrain. Für jedes Gebäude werden die Aussenwandflächen gemäss der Stockwerke

unter Terrain, der angenommenen Stockwerkshöhe und der Seitenlängen der Gebäudegrundrissform bestimmt. Das Fundament wird als Grundfläche des Gebäudes als identisch der Fläche eines Geschosses angenommen. Das Gebäude wird als vollständig über den Untergeschossen liegend angenommen, daher werden keine Dächer des Gebäudes unter Terrain des berücksichtigt. Die Tiefgarage jedoch wird als separater Bau unter Terrain berechnet, welcher nicht vom Gebäude überdeckt wird und somit eine Decke unter Terrain hat. Für weitere Details und Implementierung im Modell siehe Anhang 10.3.2.

4.2.2.3 Gebäudehülle über Terrain

Die Gebäudehülle über Terrain umfasst Aussenwände, Fenster, Türen und Dächer.

Aussenwände werden über die Seitenlängen der Gebäude, der Stockwerkshöhe und der Anzahl der Geschosse über Terrain bestimmt. Diese sind massgebend für die Berechnung der Fassade und Aussenwandkonstruktion. Davon ausgenommen sind Fensteranteile, welche per Modellannahme⁴ 35% der Aussenwände über Terrain ausmachen. Türen werden im Modell nicht explizit berücksichtigt.

In der Dachform wird zwischen Schräg- und Flachdach unterschieden. Während die Bauteilfläche der Dachkonstruktion in beiden Fällen als flach angenommen wird, ist die Fläche der Dachhaut eines Schrägdachs einerseits durch den Dachwinkel von per Annahme 35°, andererseits durch eine Dachauskrugung erhöht.

Weitere Details bezüglich Dimensionierung der Gebäudehülle über Terrain sind in Anhang 10.3.3 spezifiziert.

4.2.2.4 Innen- und Aussenbauteile

Die Innen- und Aussenbauteile umfassen tragende und nicht-tragende Innenwände, Geschossdecken, Böden⁵ und die aussen liegende Konstruktion (u.a. Balkone) inklusive Vordach.

Gemäss der Dimensionierungsvorgabe der Vorprojektphase der Norm SIA 2032:2020 werden Innenwände als 80% der Geschossfläche aller Geschosse (unter und über Terrain) angenommen und zu gleichen Teilen auf tragende und nicht-tragende Komponenten aufgeteilt.

Die Bauteilflächen der Geschossdecken werden durch die Summe der Flächen aller Geschosse über und unter Terrain eines Gebäudes abzüglich des obersten Stockwerks⁶ und unter Berücksichtigung der Gebäudemultiplizität im Bauprojekt berechnet.

Die aggregierte Bauteilfläche der Böden wird durch Stockwerksfläche und Anzahl der Stockwerke über Terrain berechnet, unter der Annahme, dass Stockwerke unter Terrain keine verarbeiteten Böden aufweisen, sondern durch die Tragekonstruktion gegeben sind.

⁴ Der Parameterwert für Fensteranteile ist so gewählt, dass er für durchwegs neue Gebäude im Zeitraum der Stichprobe zutreffend ist. Alte Wohngebäude haben meist einen geringeren Flächenanteil. Das PACTA-Modul berücksichtigt die zeitliche Änderung des Parameters in Abhängigkeit des Gebäudealters.

⁵ Die Zusammenfassung der Elementgruppen in der Norm SIA 2032:2020 und die darauf basierende Tabelle 1 enthalten Böden nicht explizit, jedoch werden diese in der Anwendung der KBOB-Ökobilanzdaten berücksichtigt.

⁶ Beiträge des obersten Stockwerks zur Grauen Energie werden über die Dachkonstruktion berücksichtigt, sowohl für Gebäude als auch für Tiefgaragen.

Die Bauteilflächen der Balkone werden durch die Modellannahme von 7 m² pro Wohneinheit angerechnet.

Anhang 10.3.4 spezifiziert die Dimensionierung und Modellimplementierung der einzelnen Komponenten im Detail.

4.2.2.5 Gebäudetechnik

Die Elementgruppe zu Gebäudetechnik umfasst elektro-, wärme-, luft- und wassertechnische Anlagen. Mit Ausnahme photovoltaischer Anlagen werden KBOB-Ökobilanzdaten über die Bezugsgrösse der Energiebezugsfläche (EBF) angewendet, welche wiederum durch die Flächen der Geschosse über Terrain abgeschätzt wird.

Photovoltaische Anlagen werden über die Bezugsgrösse der Bauteilfläche der Solarkollektoren mit 40% eines Schrägdachs bzw. 80% eines Flachdachs abgeschätzt.

Weitere Details zu Gebäudetechnik sind aus Anhang 10.3.5 ersichtlich.

4.3 Anwendung KBOB-Ökobilanzdaten gemäss SIA 2032:2020

Die KBOB-Ökobilanzdaten werden als Eingangsgrössen für die Berechnung der nicht-erneuerbaren Primärenergie (PEne) und der grauen Treibhausgasemissionen (gTHG-E) gemäss Norm SIA 2032:2020 angewendet. Hierfür werden die Gebäudeelemente in Tabelle 1 identifiziert und gemäss der Materialisierung mit den KBOB-Ökobilanzdaten verknüpft.

Informationen zur Materialisierung sind aus den Baueingabedaten bekannt, umfassen jedoch nur das Vorkommen von Materialien, jedoch nicht deren effektiv verbaute Mengen. Weiters sind die Materialisierungen nicht jedes Bauelements aus den Baueingabedaten ersichtlich. In der Anwendung der Ökobilanzdaten werden somit folgende Annahmen getroffen: Wenn die Materialisierung eines Bauelements bekannt ist und mehrere Materialien umfasst, besteht das Element zu gleichen Teilen aus jedem dieser Materialien; wenn keine Materialisierung eines Bauelements bekannt ist, werden für den Schweizer Wohnbau typische Ersatzwerte angenommen. Die angewendeten KBOB-Ökobilanzdaten mitsamt Ersatzwerten sind in Anhang 10.4 tabellarisch dargestellt.

5 Modellresultate

Abschnitt 5.1 umfasst die Darstellung der Resultate des Modells bezüglich nicht-erneuerbarer Primärenergie (PEne) und grauen Treibhausgasemissionen (gTHG-E), basierend auf den verfügbaren Informationen der Baueingabedaten. In der Folge wird dieses Modell als Detailmodell bezeichnet. Diese Ergebnisse werden in Abschnitt 5.2 mit den Werten eines Referenzgebäudes verglichen. Abschnitt 5.3 zeigt den Vergleich der Modellresultate mit einer Grobschätzung, für welche lediglich die Dimensionierung der Gebäude, nicht aber zusätzliche Anbauten (z.B. Tiefgarage) oder die Materialisierung als Informationsgrundlage für das Modell herbeigezogen wird. Dieses reduzierte Modell wird in der Folge als Grobmodell bezeichnet. Der Vergleich mit dem Detailmodell zeigt die gesamtheitliche Unterscheidungskraft der erweiterten Informationen gemäss Baueingabedaten im Modell. In Abschnitt 5.4 werden einzelne Einflüsse in Form von Sensitivitäten hinsichtlich Kubatur, Materialien, Dämmung, Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen separat betrachtet. Die Validierung des PACTA-Scope 3 Modells erfolgt in Abschnitt 6.

5.1 Ergebnisse Detailmodell

Abbildung 1 zeigt die Menge an grauen Treibhausgasemissionen (gTHG-E) und nicht-erneuerbarer Primärenergie (PEne) aus Erstellung, Transport und Entsorgung jeweils pro Jahr der Nutzungsdauer und pro m² Energiebezugsfläche in Form eines Histogramms für die gesamte Stichprobe an Neubauten zur reinen Wohnnutzung.

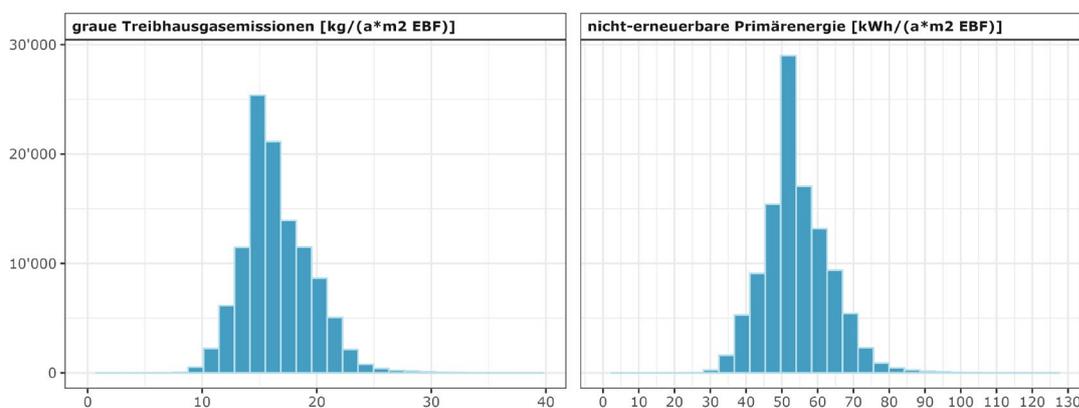


Abbildung 1: Histogramm der grauen Treibhausgasemissionen [kg/(a*m² EBF)] und der nicht-erneuerbaren Primärenergie [kWh/(a*m² EBF)] jeweils pro Jahr und Energiebezugsfläche der Projekte der Stichprobe gemäss Datenquelle Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Aus Abbildung 1 werden die typischen Grössenordnungen der Metriken zur grauen Energie eines Gebäudes ersichtlich. Pro Quadratmeter Energiebezugsfläche liegen die jährlichen Verbrauchswerte für gTHG-E im Bereich 10-25 kg/(a*m²) (Median 16.1 kWh/(a*m²)), jene für PEne im Bereich 30-80 kWh/(a*m²) (Median 52.7 kWh/(a*m²)).

Die beiden Metriken werden in Abbildung 2 separat nach Nutzungstyp in Bezug auf EFH-, MFH- und gemischte Projekten ausgewiesen. Hieraus wird ersichtlich, dass die Skaleneffekte von

den tendenziell grösseren MFH zu Effizienzgewinnen führen und die graue Energie pro m² Energiebezugsfläche tiefer liegt. Der in der Stichprobe seltene Typ gemischter Projekte wird durch das Modell sehr ähnlich wie MFH-Projekte behandelt, in der Folge zeigen die Metriken vergleichbare Grössenordnungen.

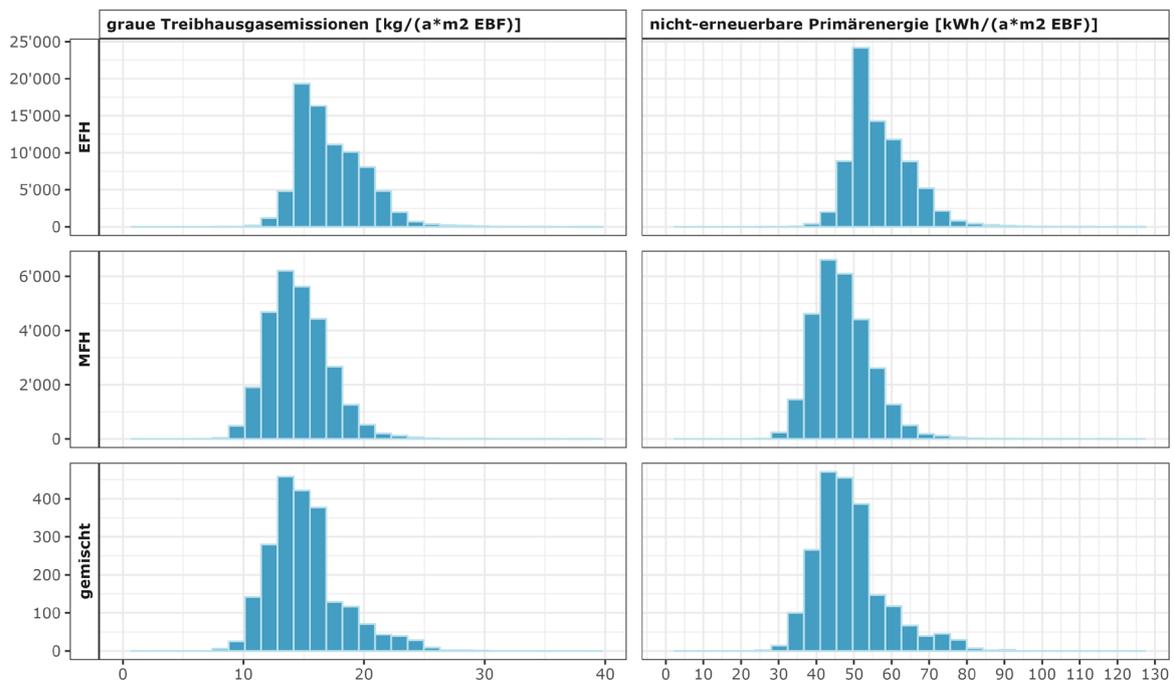


Abbildung 2: Histogramm der grauen Treibhausgasemissionen (gTHG-E) [kg/(a*m² EBF)] und der nicht-erneuerbaren Primärenergie (PEne) [kWh/(a*m² EBF)] jeweils pro Jahr und Energiebezugsfläche nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Die Effizienzgewinne mit Gebäudegrösse werden in Abbildung 3 nach Nutzungstyp und Gebäudegrösse ersichtlich, wobei die Verteilungen der grauen Energie für die jeweilige Kategorie durch die Boxen, welche durch das 1. und 3. Quartil begrenzt und durch den Median mittig unterteilt werden, gezeigt. Für Bauten vergleichbarer Energiebezugsfläche ist die Menge an grauer Energie vergleichbar, sowohl gemessen in grauen Treibhausgasemissionen als auch in der nicht-erneuerbaren Primärenergie. Damit ist die vor allem die Grösse des Gebäudes ausschlaggebend, nicht aber der Nutzungstyp. Die Differenz in der Lage der Verteilungen in Abbildung 1 und Abbildung 2 ist somit nicht durch einen unterschiedlichen Nutzungstyp, sondern durch die Tatsache begründet, dass EFH kleinere Gebäudegrössen und Energiebezugsflächen haben.

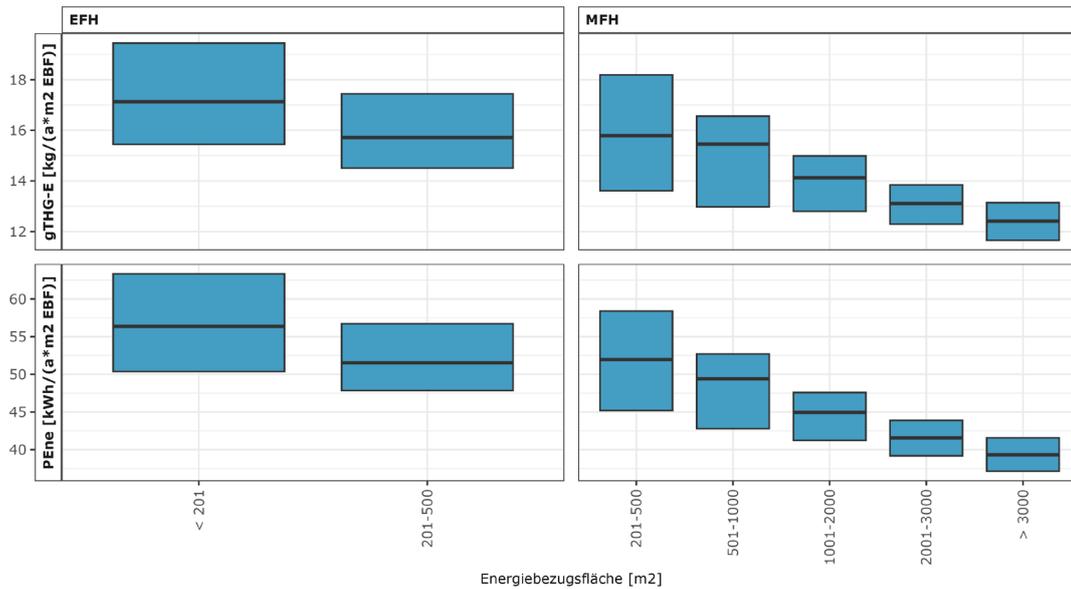


Abbildung 3: Verteilungen der grauen Treibhausgasemissionen (gTHG-E) [kg/(a*m² EBF)] und der nicht-erneuerbaren Primärenergie (PEne) [kWh/(a*m² EBF)] nach Gebäudegrösse und Nutzungstyp. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Abbildung 4 stellt die Beiträge der einzelnen Gebäudekomponenten zur Gesamtbilanz bezüglich grauer Treibhausgasemissionen (in kg/(Jahr*m² EBF)) separat und nach Nutzungstyp dar. Tiefgaragenbeiträge werden separat und proportional zur Gesamtemission des Gebäudes ohne Tiefgarage berechnet und ausgewiesen. Somit addieren sich die Anteile für ein einzelnes Gebäude ohne Tiefgarage zu 100%. Für ein Gebäude mit Tiefgarage ergeben die Beiträge ohne Tiefgarage 100%, eine Tiefgarage erhöht die Gesamtbilanz über diesen Wert hinaus.

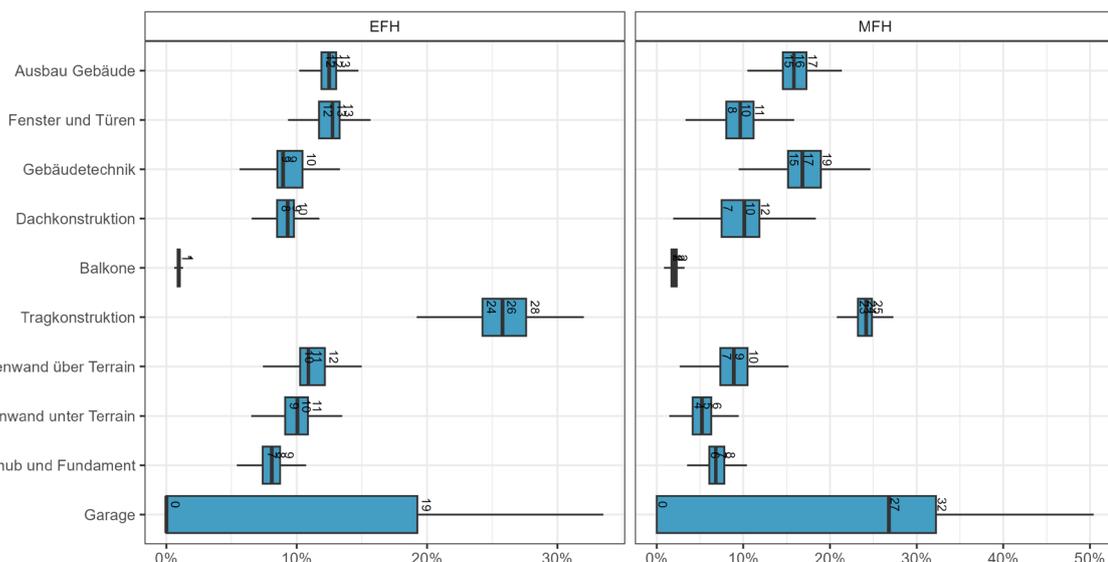


Abbildung 4: Verteilungen der prozentuellen Beiträge zu grauen Treibhausgasemissionen [kg/(a*m² EBF)] nach Nutzung. Tiefgaragenbeiträge werden separat und in Proportion zur Gesamtemission des Gebäudes ausgewiesen. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Die Kästen in Abbildung 4 werden durch das 1. und 3. Quartil der jeweiligen Verteilung begrenzt und durch den Median geteilt. Diese Werte sind neben den Kästen angegeben. Es zeigt sich, dass die Tragekonstruktion den grössten Teil der grauen Treibhausgasemissionen ausmacht. Vor allem für Mehrfamilienhäuser und der oft aufwendigeren Gebäudetechnik, z.B. durch Lüftungsanlagen, trägt diese mit fast einem Fünftel zu den Gesamtemissionen bei. Signifikante Beiträge stammen ebenso aus dem Ausbau des Gebäudes, der Dachkonstruktion, den Fenstern und Türen. Für letztere ist der prozentuelle Anteil in MFH geringer aufgrund der tendenziell grösseren Stockwerksflächen und der verhältnismässig kleineren Aussenwände. Dies ist auch in den Beiträgen der Aussenwände unter respektive über Terrain ersichtlich. Balkone haben gemäss Modell und der zugrunde liegenden Annahme von 7 m² Balkonfläche pro Wohneinheit einen verhältnismässig kleinen Beitrag. Tiefgaragen erhöhen die gTHG-E eines EFH zusätzlich um etwa 20%. Aufgrund grösserer Verkehrsflächen in Tiefgaragen von MFH liegt dieser zusätzliche Beitrag bei diesem Nutzungstyp mit etwa 30% noch höher.

In Abschnitt 5.2 werden diese Ergebnisse mit einem Referenzgebäude verglichen.

5.2 Vergleich aus Detailmodell und Referenzgebäude

Die Ergebnisse des Detailmodells, also des Gebäudemodells unter Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen aus den Baueingabedaten, werden in diesem Abschnitt mit den Werten für das Gebäude Sihlbogen in Leimbach ZH, welches als Referenzgebäude dient, verglichen. Für dieses Gebäude wurde eine Bestimmung im Anhang der Norm SIA 2032:2010 publiziert.

Der Vergleich basiert auf den prozentuellen Beiträgen der einzelnen Gebäudekomponenten zu der Gesamtmenge an grauen Treibhausgasemissionen eines Gebäudes, siehe in Abbildung 4 in Abschnitt 5.1. Abbildung 5 zeigt die Verteilung der prozentuellen Beiträge zur Gesamtbilanz über alle Mehrfamilienhäuser der Stichprobe (blaue Kästen) und vergleicht diese mit den prozentuellen Beiträgen des Referenzgebäudes (pinke Punkte). Die pinken Beschriftungen geben die prozentuellen Beiträge der Ergebnisse der separaten Studie zum Referenzgebäude an.

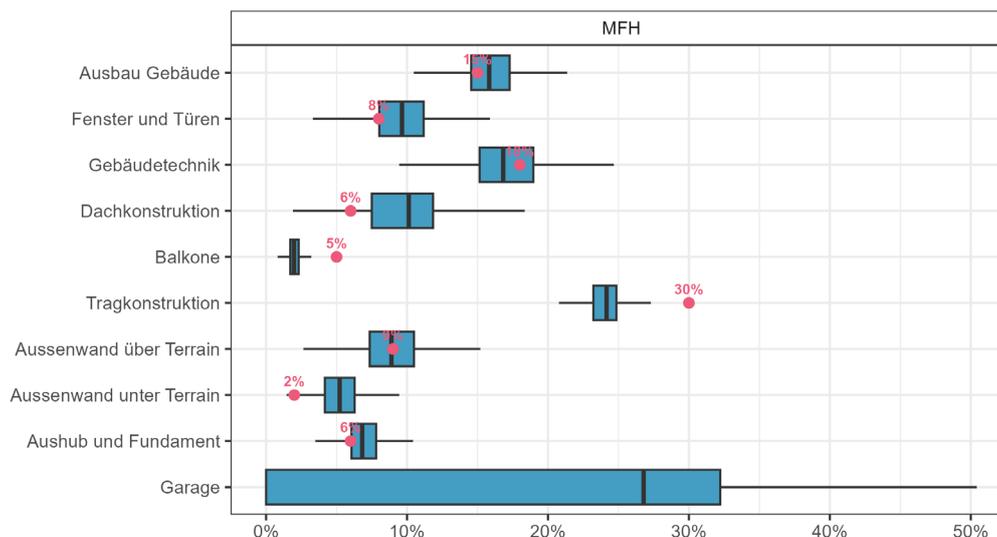


Abbildung 5: Vergleich der Verteilungen der prozentuellen Beiträge zu grauen Treibhausgasemissionen [kg/(a*m² EBF)] für MFH mit einem Referenzgebäude (ohne Tiefgaragenbeitrag). Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023; SIA 2032:2021 (Faktorverlag).

Bei dem Referenzgebäude handelt es sich um einen selbst für ein MFH überdurchschnittlich grossen Bau, für den eine massive Tragekonstruktion notwendig ist. Da die KBOB-Ökobilanzdaten auf Mittelwerten über alle Gebäudegrössen basieren, die im Durchschnitt jedoch kleiner sind als das Referenzgebäude, unterschätzen diese Durchschnittsdaten die notwendige Tragekonstruktion für den Sihlbogen. Dadurch werden die Beiträge der meisten restlichen Gebäudekomponenten durch die relative Betrachtung der Beiträge tiefer. Ausnahmen bilden hier vor allem die aufwendige Gebäudetechnik und die grösseren Balkonflächen des Referenzgebäudes. Unter Berücksichtigung dieser gebäudespezifischen Eigenschaften des Referenzbaus ergibt sich eine hohe Übereinstimmung des Detailmodells mit der manuellen Auswertung der gTHG-E des Referenzgebäudes.

5.3 Ergebnisse und Vergleich mit Grobmodell

In diesem Abschnitt werden die Modellresultate, die aus einer Detailschätzung unter Berücksichtigung aller Informationen aus den Baueingabedaten erzielt wurden (siehe Abschnitt 5.1), mit den Resultaten aus einem minimalen Satz an Informationen verglichen, der ausschliesslich auf der Gebäudekubatur beruht. Der Zweck dieses Vergleichs besteht darin, den Informationsgewinn durch zusätzliche Detailinformationen hinsichtlich grauer Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbarer Primärenergie zu quantifizieren.

Die Menge an Informationen, die in das Grobmodell einfließen, soll jener entsprechen, welche aus dem Eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) des Bundesamts für Statistik verfügbar ist (BFS, 2023). Es werden somit nur Informationen zum Gebäude hinsichtlich Stockwerksanzahl über Terrain, Gebäudegrundfläche und der Anzahl Wohneinheiten verwendet. Die restlichen Angaben zum Gebäude werden durch die Ersatzwerte hinsichtlich Dimensionierung, Ausstattung und Materialisierung behandelt.

Abbildung 6 zeigt die Histogramme der Verteilungen aus dem Detail- und Grobmodell hinsichtlich grauer Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbarer Primärenergie.

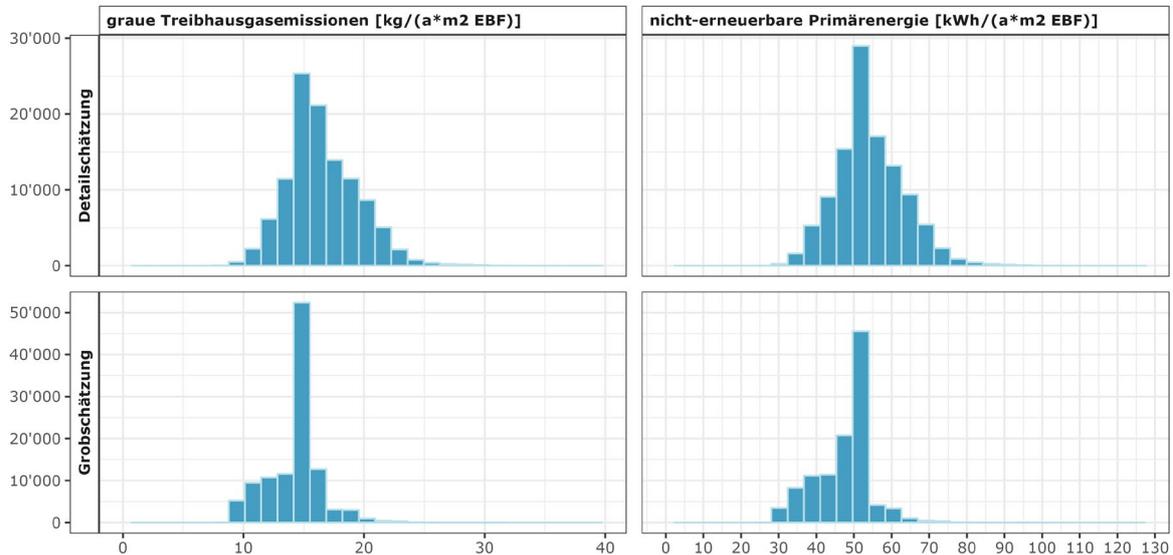


Abbildung 6: Vergleich der Verteilungen der grauen Treibhausgasemissionen und der nicht-erneuerbaren Primärenergie jeweils pro Jahr und Energiebezugsfläche aus Detail- und Grobmodell. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Aus der Gegenüberstellung von Detail- und Grobmodell in Abbildung 6 wird ersichtlich, dass die zusätzlichen Detailinformationen zu den Projekten in den Baueingabedaten zu einer breiter gestreuten Verteilung und damit besserer Diskriminierungskraft im Modell führen. Die Grössenordnungen der Resultate zwischen den Modellen sind jedoch für beide Metriken in einem ähnlichen numerischen Bereich. Dies zeigt, dass die beiden Metriken exakter durch Berücksichtigung der Detailinformationen bestimmt werden können, die Schätzung anhand minimaler Informationen jedoch bereits eine hohe Güte aufweist, mit der Tendenz, die Werte an PEne und gTHG-E zu unterschätzen. Wie in Abschnitt 5.4 ersichtlich wird, führen vor allem Tiefgaragen, Dämmungsmaterialien und zusätzliche Energiesysteme zu den höheren Werten im Detailmodell.

Deutlicher wird die Lage der Verteilung hinsichtlich der Tendenz zu höherer PEne und gTHG-E in Abbildung 7, in welcher die Verteilungen separat für EFH und MFH dargestellt werden. Die Darstellung wird auf graue Treibhausgasemissionen reduziert, da sich die Verteilungen verschiedener Metriken hauptsächlich hinsichtlich der Grössenordnung und Einheit, nicht jedoch hinsichtlich der Form der Verteilungen unterscheiden.

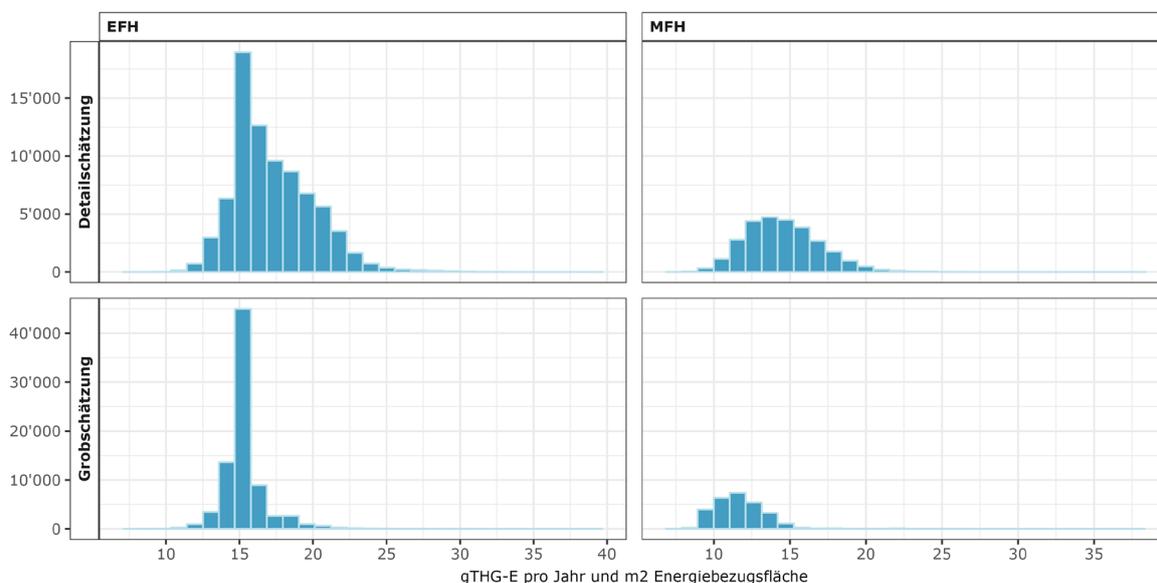


Abbildung 7: Vergleich der Verteilungen der grauen Treibhausgasemissionen aus Detail- und Grobmodell nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Während die Vergleiche in Abbildung 6 und Abbildung 7 die Verteilungen über die Stichprobe hinweg, jedoch nicht auf Projektebene darstellen, zeigt Abbildung 8 die Verteilung für einen Vergleich einzelner Projekte untereinander. Hierzu wird für jedes Projekt in der Stichprobe die relative Abweichung, $r_{Detail/Grob}$, der gTHG-E bzw. PEne aus dem Detailmodell, E_{Detail} , zu jenen aus dem Grobmodell, E_{Grob} , gebildet $r_{Detail/Grob} = E_{Detail}/E_{Grob} - 1$. Positive Prozentwerte indizieren, dass Detailinformationen zu höheren Mengen an gTHG-E und PEne führen. Negative Werte hingegen bedeuten deren Reduktion durch bauliche Massnahmen, welche nur durch Detailinformationen identifiziert werden konnten. Abbildung 8 zeigt das Histogramm dieses Verhältnisses nach Nutzungstyp der Bauprojekte.

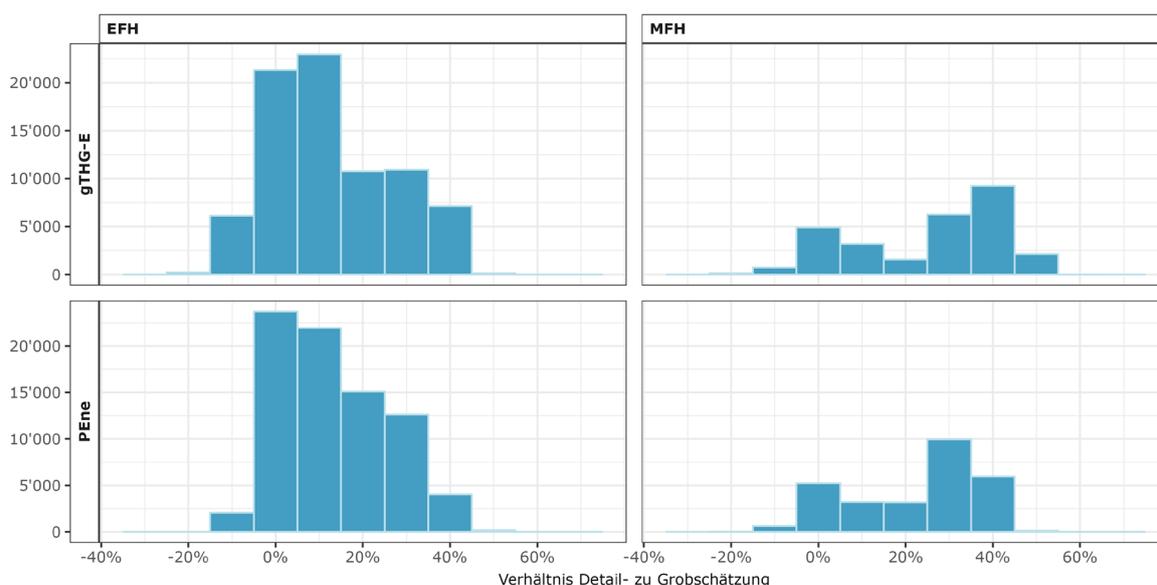


Abbildung 8: Vergleich der Verteilung der relativen Abweichung der grauen Treibhausgasemissionen und der nicht-erneuerbaren Primärenergie aus dem Detail- zum Grobmodell. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Abbildung 8 zeigt, dass das Verhältnis der Ergebnisse aus dem Detail- und Grobmodell zwischen -20% und 60% liegt, für beide Metriken gTHG-E bzw. PEne und für beide Nutzungstypen. Dies bedeutet, dass die Resultate aus dem Detailmodell im Bereich von 80% bis 160% der Werte aus dem Grobmodell liegen. Dies quantifiziert die Spannweite, innerhalb welcher das Detailmodell zu einer besseren Einschätzung der grauen Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbaren Energie eines Bauprojekts führt.

5.4 Sensitivitäten

5.4.1 Gebäudekubatur

5.4.1.1 Stockwerksfläche

Den grössten Einfluss auf gTHG-E und PEne in Erstellung, Transport und Entsorgung hat das Volumen der verbauten Materialien. Dieser Effekt wird durch eine Skalierungsanalyse, siehe Anhang 10.5, verdeutlicht, in der als Beispielgebäude ein EFH ohne Tiefgarage, Balkone, Solar- und Erdwärmeanlagen betrachtet wird. Die Stockwerksfläche wird für die Skalierung zwischen den Werten 100 m² bis 700 m² variiert (*ceteris paribus*).

Die Analyse zeigt, dass die Gesamtmenge der gTHG-E und PEne aus Erstellung, Transport und Entsorgung eines Gebäudes stark mit der Flächenzunahme steigt. Jedoch ist die Zunahme insgesamt leicht unterproportional, da Bauteilflächen von Aussenwänden unterproportional zur Fläche steigen. Relativ zur Energiebezugsfläche bedeutet dies, dass Effizienzgewinne mit zunehmender Fläche bis zu einem moderaten Level der Gebäudegrösse erzielt werden können. Für sehr grosse Gebäude jedoch muss die Tragekonstruktion signifikant verstärkt werden, was der Reduktion der gTHG-E und PEne pro EBF durch Grösseneffizienz entgegenwirkt. Aufgrund der KBOB-Ökobilanzdaten kann dieser Effekt jedoch nicht abgeschätzt werden, da diese keine Abhängigkeit der Gebäudegrösse zulassen.

Die Resultate der Sensitivitätsanalysen und weitere Details zum Skalierungsverhalten finden sich in Anhang 10.5.

5.4.1.2 Tiefgaragenbeiträge

Der grösste Treiber der nicht-erneuerbaren Primärenergie und grauen Treibhausgasemissionen ist die Gebäudekubatur. Das Vorhandensein einer Tiefgarage liefert durch den zusätzlichen Bau unter Terrain signifikante Beiträge. Abbildung 9 zeigt den Vergleich auf Projektebene aus dem Detailmodell zu einem identischen Modell für Gebäude, für welches jedoch die Tiefgaragenbeiträge nicht miteinbezogen wurden, jeweils nach Nutzungstyp. Die relative Abweichung zeigt die Zunahme in den Metriken gTHG-E und PEne, welche durch den zusätzlichen Bau generiert wird. Z.B. bedeutet ein Wert von 20%, dass die Tiefgarage zusätzliche 20% der gTHG-E bzw. PEne des Gebäudes (ohne Tiefgarage) ausmacht.

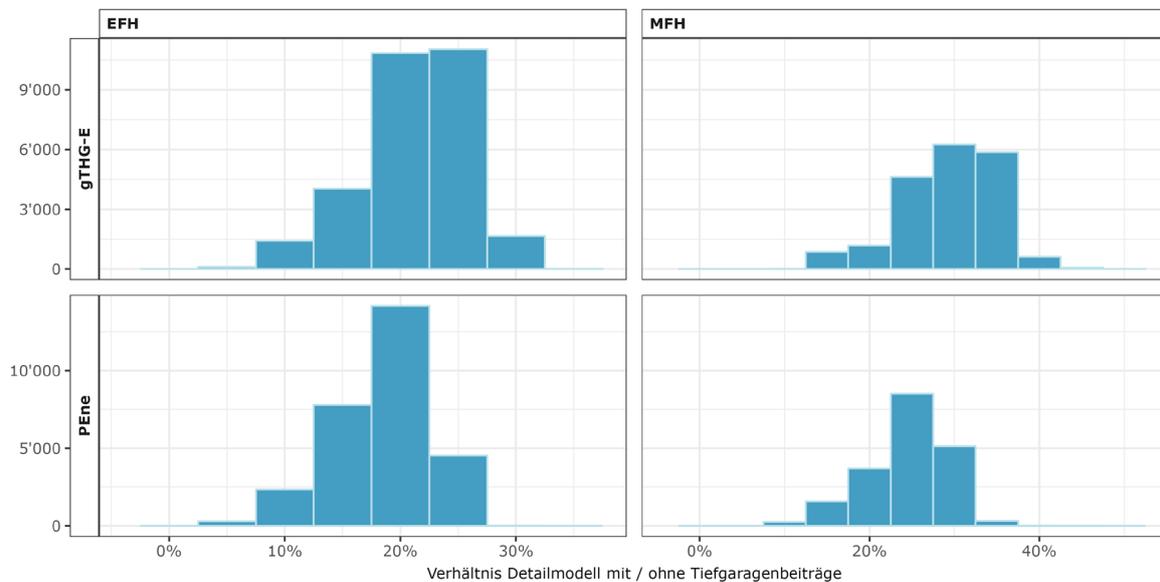


Abbildung 9: Verhältnis der grauen Treibhausgasemissionen und der nicht-erneuerbaren Primärenergie des Detailmodells zu einem identischen Gebäude ohne Berücksichtigung der Tiefgarage. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

In Abbildung 9 wurden nur Projekte berücksichtigt, in denen eine Tiefgarage gebaut und durch diese die Gesamtkubatur erhöht wurde (Stichprobengrösse: 29'117 EFH, 19'489 MFH). Bauprojekte ohne Tiefgaragen haben identische Werte in den beiden Modellen und damit ein Verhältnis von 1. Die Verteilung dieses Verhältnisses über die Gebäude der Stichprobe hinweg zeigt, dass eine Tiefgarage die nicht-erneuerbare Primärenergie respektive grauen Treibhausgasemissionen um ca. 15-25% für EFH und ca. 20-35% für MFH erhöht.

5.4.2 Materialisierung und Dämmung

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse der Informationen über unterschiedliche Materialisierung und des Vorliegens eines gesamtgedämmten Gebäudes separat untersucht. Die Materialisierung bezieht sich ausschliesslich auf die Informationen über verwendete Baumaterialien in den verschiedenen Bauteilen.

5.4.2.1 Einfluss der Materialisierung

Der Einfluss der verbauten Materialien in den verschiedenen Bauelementen wird über eine Sensitivitätsanalyse betrachtet, in welcher das Detailmodell unter Berücksichtigung aller Materialien mit einem reduzierten Modell, in dem ausschliesslich Ersatzwerte für verbaute Materialien angewendet werden, verglichen. Abbildung 10 zeigt über die gesamte Stichprobe hinweg die Verteilungen der prozentuellen Unterschiede, welche durch die Informationen zu Materialisierung gegenüber den Ersatzwerten auf Gebäudeebene erhalten werden.

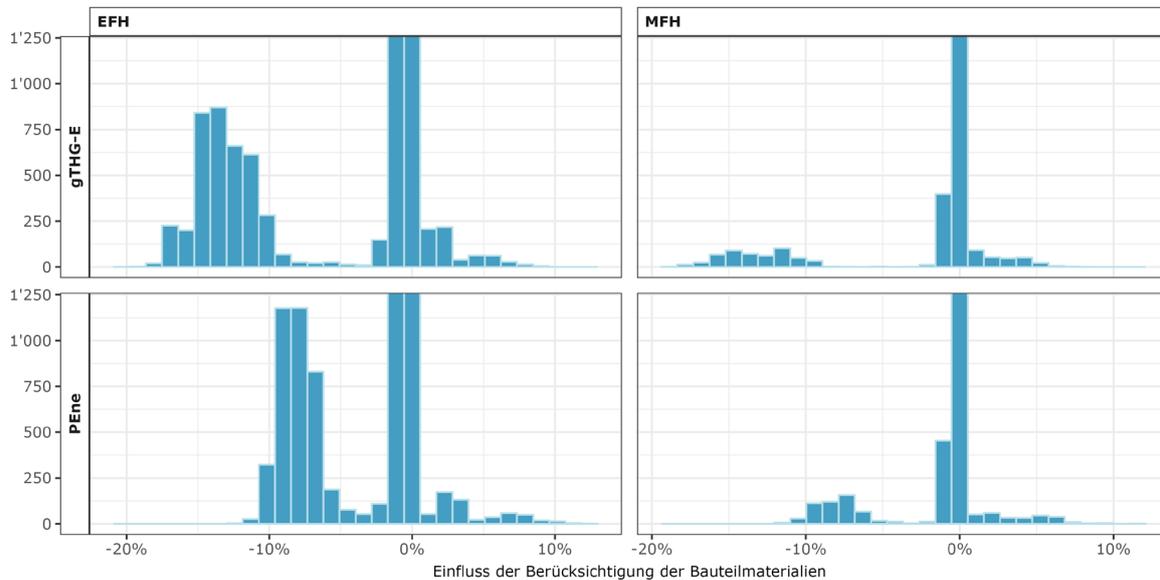


Abbildung 10: (y-Achse beschränkt) Einfluss der Informationen zu Baumaterialien auf graue Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbare Primärenergie. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Da der Einfluss der Baumaterialien oftmals gering ist, wurde in Abbildung 10 die y-Achse auch das Intervall auf $[0, 1'250]$ beschränkt, um die Grössenordnung des Einflusses bei grossen Abweichungen zu verdeutlichen. Die Berücksichtigung der Detailinformationen zu Materialien im Vergleich zu den Ersatzwerten verdeutlicht, dass durch die bewusste Wahl an Materialien die gTHG-E und PEne aus Erstellung, Transport und Entsorgung in einem Bereich von -20% bis +10% beeinflusst werden kann. Eine Reduktion kann vor allem durch Holzbauweise erreicht werden. Eine Erhöhung der Werte ergibt sich vor allem überdurchschnittliche Verwendung von Metall und Glas.

Um die Reduktion durch Holzbauweise zu quantifizieren, werden jene Gebäude der Stichprobe, welche Holzbauteile enthalten in folgender Sensitivitätsbetrachtung beleuchtet. In einer Modellrechnung wurden alle Holzelemente vernachlässigt und durch Ersatzwerte bilanziert. Die Änderungsrate der PEne und gTHG-E des Detailmodells zu diesem reduzierten Modell wird in Abbildung 11 dargestellt. Negative Werte bedeuten, dass die Mengen an PEne bzw. gTHG-E durch Holzbauweise um den entsprechenden Prozentsatz reduziert wird.

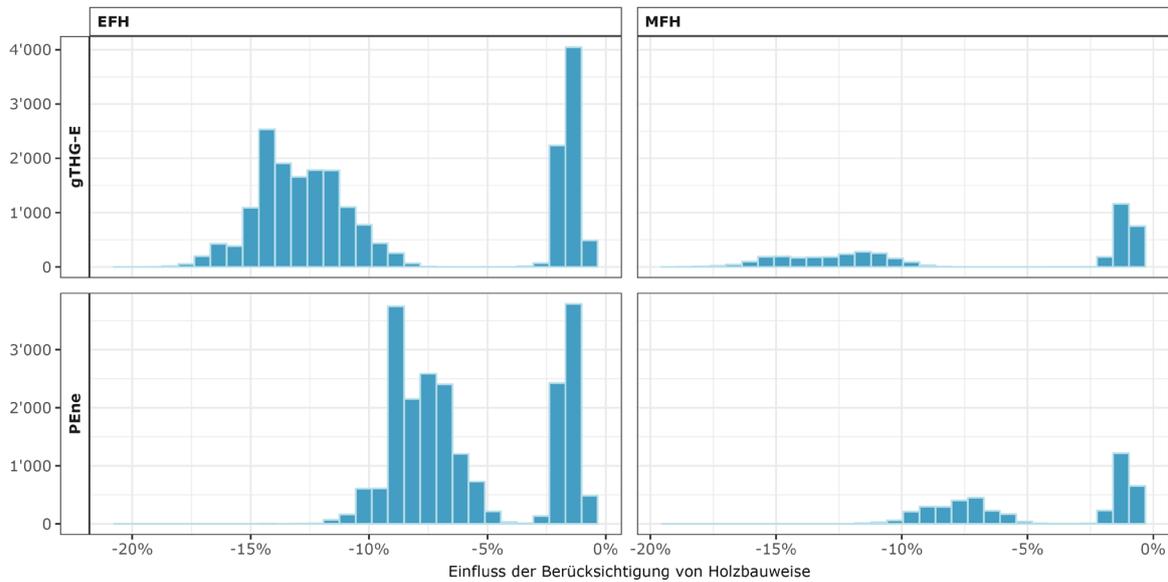


Abbildung 11: Einfluss von Holzelementen auf graue Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbare Primärenergie. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

5.4.2.2 Einfluss der Dämmung

Der Beitrag einer Dämmung eines Gebäudes wird über eine Sensitivitätsanalyse betrachtet, in der alle Gebäude der Stichprobe, für welche aus den Baueingabedaten bekannt ist, dass sie über eine Dämmung verfügen (Stichprobengrösse 67'097, davon 48'082 EFH, 19'015 MFH), die Werte für PEne und gTHG-E aus dem Detailmodell mit jenen aus einem reduzierten Modell, für welche die Ersatzwerte hinsichtlich Dämmung angenommen werden, verglichen werden. Abbildung 12 zeigt die relative Abweichung des Detailmodells vom reduzierten Modell.

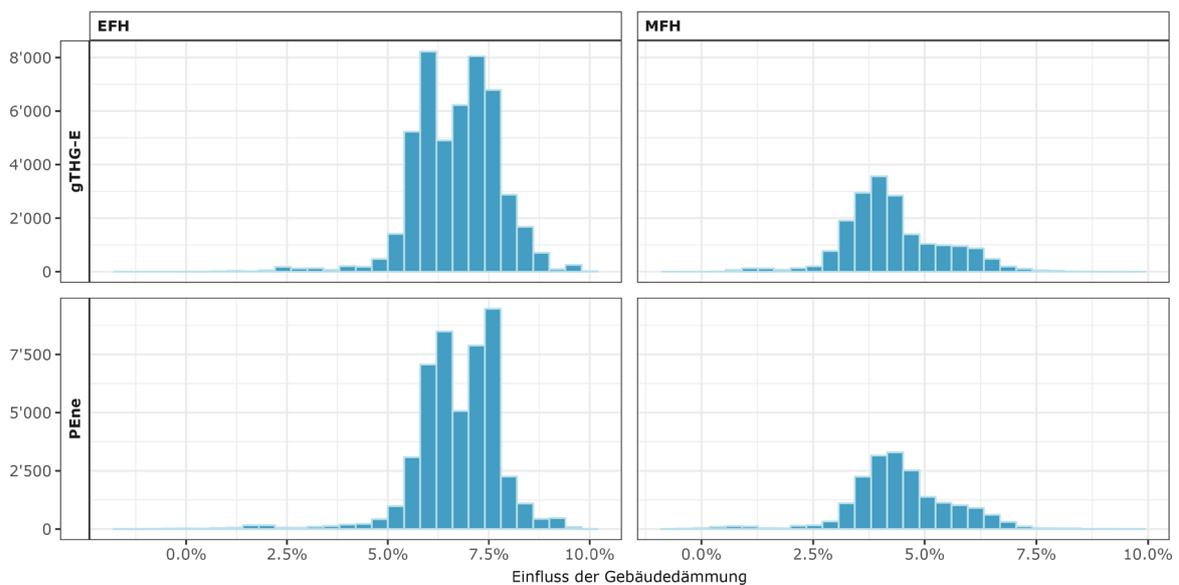


Abbildung 12: Einfluss der Gebäudedämmung auf graue Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbare Primärenergie. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Abbildung 12 zeigt, dass der Anstieg in gTHG-E und PEne in Erstellung, Transport und Entsorgung im Bereich von 5-10% liegt. Dies bezieht sich auf den Vergleich der Resultate eines Modells unter Berücksichtigung vollständiger Dämmung mit jenen aus einem Modell basierend auf Anwendung von Ersatzwerten, welche wiederum durch die typische Bauweise für Schweizer Wohngebäude konstruiert wurden und zu gleichen Anteilen aus den Werten für ungedämmte und gedämmte Gebäude hinsichtlich gTHG-E bzw. PEne bestehen. Der Vergleich zwischen einem vollständig gedämmten zu einem vollständig ungedämmten Gebäude wäre grösser als das angegebene Intervall. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Reduktion der Emissionen im Betrieb durch die Dämmung in absoluten Werten grösser ist als die durch die Erstellung, Transport und Entsorgung generierten Zuwächse in der Bilanz. In der gesamtheitlichen Betrachtung senkt eine Dämmung somit die gTHG-E und PEne eines Gebäudes signifikant.

5.4.3 Photovoltaik und Erdwärme

Die Installation von Photovoltaik- oder Erdwärmeanlagen erhöht die nicht-erneuerbare Primärenergie und Treibhausgasemission in Erstellung, Transport und Entsorgung nur gering. In einer gesamtheitlichen Betrachtung eines Gebäudes ist der Einbau jedoch von Vorteil, da die Emissionen im Betrieb stärker reduziert als durch Erstellung, Transport und Entsorgung erhöht werden. Abbildung 13 zeigt eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen, in dem die relative Abweichungen der Emissionen in einem Modell unter Einbezug dieser Bauelemente zu einem Modell unter deren Vernachlässigung gebildet wird. In den Teildiagrammen werden nur Gebäude betrachtet, über die aus den Baueingabedaten bekannt ist, dass entweder eine Erdsonde oder eine Photovoltaikanlage verbaut wurde. Die Betrachtung der Sensitivität hinsichtlich Erdsonde umfasst 19'286 Gebäude (12'128 EFH, 7'158 MFH), jene hinsichtlich Photovoltaik umfasst 20'233 Gebäude (14'373 EFH, 5'860 MFH).

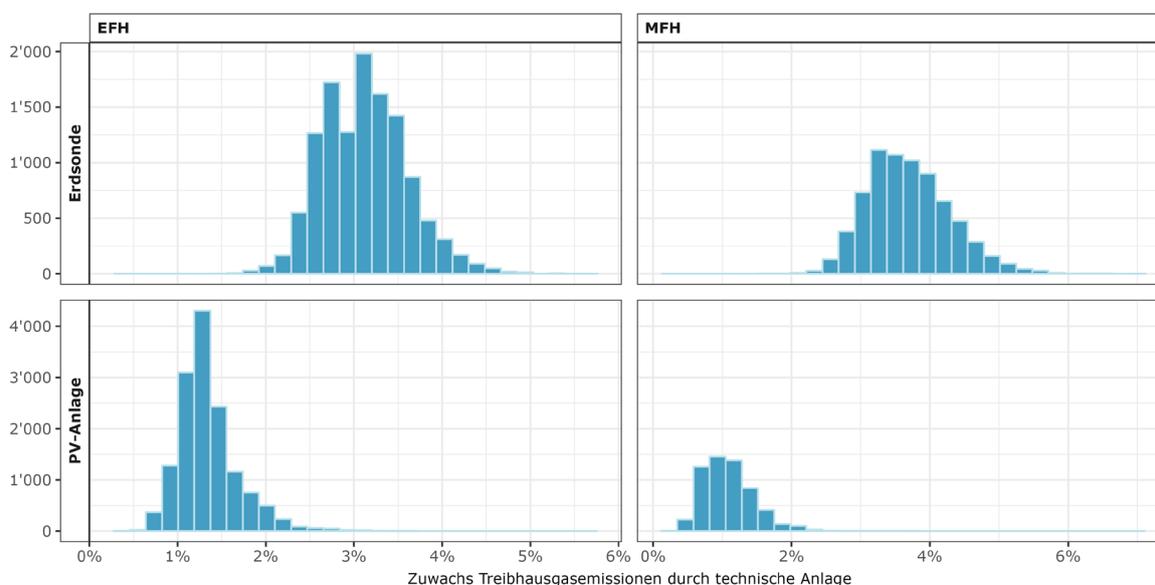


Abbildung 13: Verteilung des prozentuellen Anstiegs in grauen Treibhausgasemissionen durch Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Aus Abbildung 13 wird ersichtlich, dass die Installation von PV-Anlagen zu einem Anstieg der grauen Treibhausgasemissionen von 1-2% führt. Erdwärmeanlagen führen zu einer Erhöhung von rund 3-5%. Die Verteilungen für den Anstieg in nicht-erneuerbarer Primärenergie lassen ähnliche Schlüsse zu, siehe Abbildung 14.

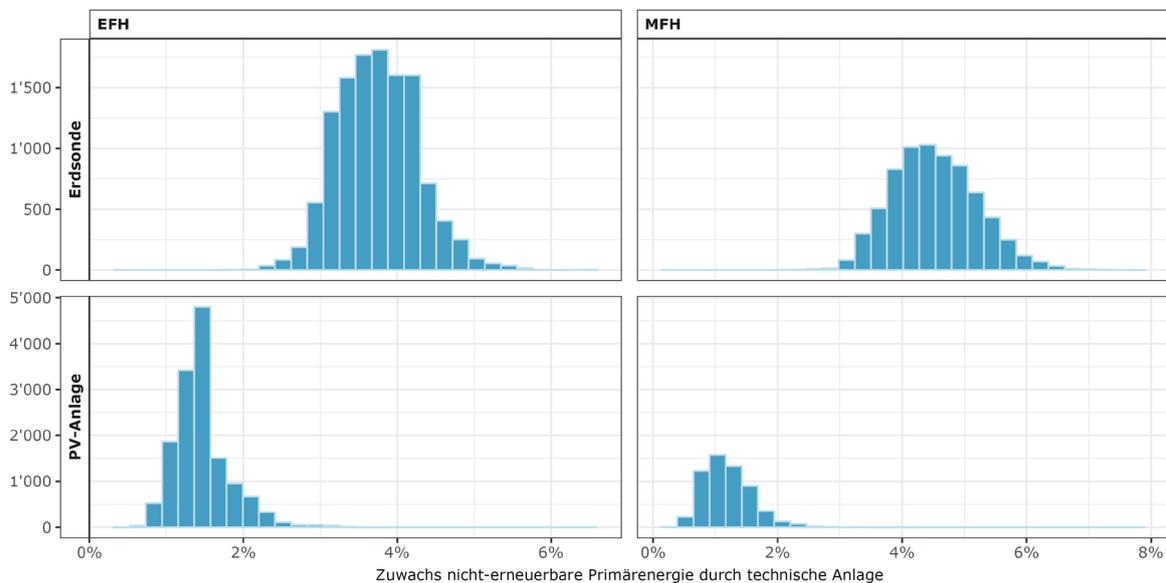


Abbildung 14: Verteilung des prozentuellen Anstiegs in nicht-erneuerbarer Primärenergie durch Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Insgesamt ist die Reduktion der Emissionen im Betrieb durch die Installation einer PV- oder Wärmeanlage in absoluten Werten grösser als die durch deren Erstellung, Transport und Entsorgung entstandenen Beiträge. In der gesamtheitlichen Betrachtung reduzieren PV- und Wärmeanlagen somit die grauen Treibhausgasemissionen und die nicht-erneuerbare Primärenergie von Gebäuden.

6 Validierung PACTA-Modul

In diesem Abschnitt werden Resultate aus dem auf Baueingaben beruhenden Modell mit jenen aus dem PACTA Scope 3 Modul verglichen. Dies dient zum Zweck, die Modellgüte des PACTA Scope 3 Moduls zu testen und dessen Funktionalität zu validieren. Weiters werden die Einflüsse jener Detailinformationen, die aus den Baueingabedaten über ein Gebäudemodell bekannt sind, jedoch in der Anwendung des PACTA-Moduls über Nutzer spezifisch eruiert und eingefügt werden müssen, quantifiziert. Der Vergleich der Modelle geschieht anhand einer Stichprobe aus Gebäuden, für welche die Resultate auf Bauelementebene verglichen werden. In diesem Abschnitt wird das in Abschnitt 4 präsentierte Modell als Validierungsmodell bezeichnet.

6.1 Stichprobenbeschreibung

Für den Detailvergleich aus Validierungsmodell und PACTA-Modul wird eine Stichprobe aus den Baueingabedaten in der Art konstruiert, dass sowohl Einfamilien- als auch Mehrfamilienhäuser unterschiedlicher Grössen enthalten sind, über die jeweils unterschiedliche Grade an Detailinformationen aus den Baueingaben bekannt ist. Die Stichprobe umfasst 17 Gebäude und ist in Tabelle 2 weiter hinsichtlich Baudetails ausgeführt. Die Projektidentifikation erfolgt über die ID der Baueingabedaten. Die weiteren Spalten enthalten die Angaben zum Nutzungstyp, der Energiebezugsfläche in m² (EBF), der Stockwerksanzahl über Terrain (STW), der Dachform (DF) und dem Vorhandensein einer vollständigen Dämmung, einer photovoltaischen Anlage (PV), einer Erdwärmanlage (EW), einer Tiefgarage (TG) und Balkonen.

ID	Nutzung	EBF	STW	Dämmung	PV	EW	TG	DF	Balkon
661201	EFH	111	2	gedämmt	-	-	-	flach	-
2627575	EFH	144	2	-	-	-	TG	schräg	Balkon
2636333	EFH	124	2	gedämmt	-	-	TG	flach	Balkon
639045	EFH	122	2	gedämmt	-	EW	-	schräg	-
764088	EFH	138	3	-	PV	-	-	flach	Balkon
2770558	EFH	124	2	gedämmt	PV	EW	TG	flach	Balkon
613771	MFH	217	3	-	-	-	-	schräg	Balkon
2625064	MFH	311	4	-	-	-	TG	flach	Balkon
2592488	MFH	317	3	gedämmt	-	EW	-	flach	Balkon
2290391	MFH	179	3	gedämmt	PV	-	-	schräg	Balkon
1979323	MFH	417	3	gedämmt	PV	EW	TG	flach	Balkon
2874749	EFH	89	2	gedämmt	-	-	-	schräg	Balkon
2875586	EFH	89	2	gedämmt	-	-	-	schräg	Balkon
2877827	EFH	89	2	-	-	-	-	schräg	Balkon
2859139	MFH	230	3	-	-	-	-	flach	Balkon
2863107	MFH	269	3	-	-	-	-	schräg	Balkon
1814492	MFH	269	3	-	-	-	-	flach	Balkon

Tabelle 2: Beschreibung der Stichprobe zum Vergleich PACTA-Modul und Validierungsmodell.
Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Tabelle 2 umfasst die Auswahl an Informationen, welche zur Diversifikation in der Stichprobenkonstruktion gedient haben. Bei fehlenden Informationen in den Baueingabedaten ist der Eintrag durch einen Bindestrich dargestellt und zeigt ein Fehlen des jeweiligen Attributs im Gebäude an. Es werden Ersatzwerte für Dämmung und Dachform angenommen. Für die Attribute PV, EW, TG und Balkon bedeuten fehlende Informationen, dass das entsprechende Element nicht im Gebäude verbaut ist. Die Informationen bezüglich Nutzung, EBF, Stockwerksanzahl, Solaranlage, Erdwärmeanlage und Tiefgarage wurden für die Validierung in das PACTA-Modul eingespeist.

6.2 Kurzbeschreibung PACTA-Modul

Das PACTA-Modul beruht auf der Norm SIA 2032:2020 (SIA, 2020) und einer Anwendung der KBOB-Ökobilanzdaten (KBOB, 2023). Für die Anwendung im PACTA Klimatest 2024 erlaubt das Modell eine granulare Angabe der Informationen zu verschiedenen Bauelementen hinsichtlich deren Vorhandensein, Volumina, Flächen und Materialisierung. Da diese Informationen jedoch nicht jedem Anwender im Detail bekannt sind, sind auch im PACTA-Modul zu Scope 3 Emissionen Ersatzwerte für den Fall unvollständiger Informationen zum Gebäude und dessen Ausbaustandard hinterlegt.

Im Zuge der Validierung des PACTA Scope 3 Moduls wurden sämtliche Modellannahmen geprüft und wo notwendig angepasst. Dies führte final zu einer Annäherung der beiden Modelle, vor allem hinsichtlich des Gebäudevolumens und der Bauteilflächen, welche die wichtigsten Faktoren für die Menge an nicht-erneuerbarer Primärenergie und grauen Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Transport und Entsorgung darstellen. Somit gelten die Dimensionierungen aus Abschnitt 4 in weiten Teilen auch für das PACTA-Modul. Verbleibende Unterschiede zwischen Validierungsmodell und PACTA-Modul sind in Abschnitt 6.3 zusammengefasst. Bezüglich Ersatzwerte für typische Materialisierungen der Bauteile finden im PACTA-Modul jene Werte Anwendung, die durch das Departement Technik und Architektur der Hochschule Luzern erstellt wurden, Anhang 10.4.

6.3 Unterschiede PACTA Scope 3 Modul und Validierungsmodell

Nach iterativer Validierung des PACTA Scope 3 Moduls mit dem Validierungsmodell verbleiben geringfügige Unterschiede zwischen den beiden Modellen, die hauptsächlich auf der Tatsache beruhen, dass das Validierungsmodell für eine Stichprobe konstruiert wurde, welche ausschliesslich neue Gebäude aus den Jahren 2009-2023 enthält. Da das PACTA-Modul auch für ältere Gebäude angewendet wird, werden Parameter teilweise in Abhängigkeit vom Baujahr, teilweise als repräsentativ für den Gebäudebestand über alle Bauperioden gewählt.

Bezüglich Gebädekubatur nimmt das PACTA-Modul eine Stockwerkshöhe von 2.9m an und führt damit zu geringfügig kleineren Gebäudevolumina als das Validierungsmodell. Die Fensterfläche des PACTA-Moduls wird in Abhängigkeit des Gebäudealters gewählt und variiert zwischen 20% und 30% des Aussenfläche von Wohnbauten. Das PACTA-Modul vernachlässigt etwaige Dachauskragungen bei Schrägdächern und führt in diesen Fällen zu geringfügig kleineren Werten für die Dachhaut. Weiters weicht der Dachwinkel vom Wert des Validierungsmodell ab und führt damit zu geringfügig anderen Werten als das

Validierungsmodell. Zudem nahm das PACTA-Modul zum Zeitpunkt der Validierung an, dass die Bauteilhöhe der Baugrubensicherung gleich hoch wie der Aushub ist, somit wird zusätzlich zur Stockwerkshöhe ein Aufschlag von 1m im untersten unterirdischen Geschoss gewählt. Im Validierungsmodell kommt hier eine Höhe identisch zur Stockwerkshöhe zur Anwendung. Ein weiterer Unterschied besteht in den Balkonflächen, welche im Validierungsmodell durch 7 m² pro Wohneinheit, im PACTA-Modul durch 10% der Stockwerksflächen geschätzt werden und somit für die Gebäude der Stichprobe grösser sind.

Für die Validierung wurde das PACTA-Modul ohne die Detailinformationen der Baueingabedaten hinsichtlich Materialisierung der Gebäudekomponenten angewendet. Somit gehen nur Ersatzwerte für die verwendeten Materialien in das PACTA-Modul ein.

6.4 Vergleich PACTA-Modul und Detailschätzung

6.4.1 Zusammenfassung Modellanwendung und Validierungsergebnisse

In Benchmarking wurden folgende Parameter des Validierungsmodells an jene des PACTA-Moduls angepasst, um die Modelle zu harmonisieren und die Vergleichbarkeit zu erleichtern. Konkret wurden die identische Stockwerkshöhe von 2.9m und die Baugrubensicherungshöhe identisch zu Höhe des Aushubs gewählt. Ausserdem wurde im Validierungsmodell eine um 0.5m erweiterte Seitenlänge für die Baugrubensicherung angenommen, wobei das PACTA-Modul mit 0.25m rechnet. Da diese Abweichungen erklärt werden konnten und im Ausmass gering sind, wurde kein weiterer Vergleich mit adjustierten Parametern durchgeführt. Tabelle 3 zeigt die Übersicht der Resultate aus PACTA- und Validierungsmodell. Der Vergleich erfolgt anhand der relativen Abweichung der grauen Treibhausgasemissionen gemäss des PACTA-Moduls, E_{PACTA} , zum Validierungsmodell, $E_{Validierung}$. Die relative Abweichung ist gegeben durch $r = E_{PACTA}/E_{Validierung} - 1$.

ID	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r	Haupttreiber der Abweichung
661201	15.10	16.10	-0.06	Validierungsmodell rechnet mit Volldämmung des Gebäudes
2627575	17.98	14.99	0.20	Validierungsmodell berücksichtigt Holzbauweise
2636333	18.61	19.23	-0.03	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell
639045	15.32	15.51	-0.01	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell
764088	12.47	12.56	-0.01	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell
2770558	19.28	20.03	-0.04	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell
613771	11.88	11.36	0.05	Grössere Balkonflächen in PACTA-Modul
2625064	14.10	12.50	0.13	Validierungsmodell rechnet mit halbem Tiefgaragenvolumen aufgrund des Vorhandenseins eines Aussenparkplatzes, PACTA-Modul wendet keine Reduktion an und führt zu höheren Tiefgaragenbeiträgen
2592488	11.75	12.43	-0.05	Validierungsmodell rechnet mit Volldämmung des Gebäudes
2290391	12.37	10.92	0.13	Validierungsmodell berücksichtigt Holzbauweise und Dämmung
1979323	15.38	16.07	-0.04	Unterschiedliche Dachform und Balkonflächen
2874749	15.88	16.46	-0.04	Unterschiedliche Dachform und Balkonflächen
2875586	15.88	16.17	-0.02	Validierung rechnet mit Volldämmung des Gebäudes; unterschiedliche Dimensionierung unter Terrain und Balkonflächen; unterschiedliche Materialisierung in Fassade
2877827	15.88	15.32	0.04	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell und unterschiedliche Dachform
2859139	11.76	11.98	-0.02	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell

2863107	11.49	11.15	0.03	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell und unterschiedliche Dachform
1814492	11.49	11.71	-0.02	Geringfügig unterschiedliche Dimensionierung in Gebäudemodell

Tabelle 3: Resultate für graue Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter Energiebezugsfläche aus Validierungs- und PACTA-Modul und deren relative Abweichung ($r = E_{PACTA}/E_{Validierung} - 1$). Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Die grössten relativen Abweichungen werden in Abschnitt 6.4.2 auf Bauteilebene weiter analysiert und erklärt. Insgesamt lassen sich alle Abweichungen durch leicht unterschiedliche Dimensionierungen im Gebäudemodell, unterschiedliche Dachformen und Materialisierungen erklären.

6.4.2 Abweichungen nach Bauteilen

In diesem Abschnitt werden die grössten relativen Abweichungen aus Tabelle 3 auf Bauteilebene analysiert und erklärt.

6.4.2.1 Gebäude ID 661201

Für das Gebäude mit ID 661201 sind die grauen Treibhausgasemissionen nach Bauelementgruppe für das PACTA- und Validierungsmodell und die relative Abweichung $r = E_{PACTA}/E_{Validierung} - 1$ in Tabelle 4 dargestellt.

Gebäudeteil	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	1.79	1.83	-0.02
Gebäudehülle unter Terrain	2.76	3.00	-0.08
Gebäudehülle über Terrain	4.48	5.86	-0.24
Innen- und Aussenbauteile	4.68	4.29	0.09
Gebäudetechnik	1.38	1.38	0.00

Tabelle 4: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 661201. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Tabelle 5 disaggregiert die Resultate weiter auf Bauteilebene. Es wird ersichtlich, dass die Unterschiede durch die Information über die Dämmung des Gebäudes, wie sie ausschliesslich im Validierungsmodell vorliegt, erklärt werden. Das PACTA-Modul hingegen rechnet mit Ersatzwerten, welche aus dem Mittelwert aus ungedämmten und gedämmten KBOB-Ökobilanzdaten gebildet werden.

Gebäudeteil	Element	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	Aushub	0.01	0.01	-0.02
Vorarbeiten	Baugrubenabschluss, Rühlwand	1.77	1.82	-0.03
Vorarbeiten	Pfählung, Mikrobohrpfahl	0.00	0.00	-
Gebäudehülle unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	1.13	1.40	-0.19
Gebäudehülle unter Terrain	Aussenwand unter Terrain	1.63	1.60	0.02
Gebäudehülle unter Terrain	Dach unter Terrain	0.00	0.00	-
Gebäudehülle über Terrain	Aussenwandkonstruktion über Terrain	0.96	0.92	0.04
Gebäudehülle über Terrain	Äussere Wandbekleidung über Terrain	0.58	0.90	-0.36
Gebäudehülle über Terrain	Fenster	1.49	1.79	-0.17
Gebäudehülle über Terrain	Dachkonstruktion	0.86	0.75	0.15
Gebäudehülle über Terrain	Dachhaut	0.60	1.50	-0.60

Innen- und Aussenbauteile	Innenwandkonstruktion, Wandbekleidung	1.43	1.43	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Geschossdecke	1.49	1.49	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Bodenbelag, Deckenbekleidung	1.36	1.36	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Balkon, Vordach	0.39	0.00	∞
Gebäudetechnik	Elektroanlage	0.43	0.43	0.00
Gebäudetechnik	Wärmetechnische Anlage	0.41	0.41	0.00
Gebäudetechnik	Lufttechnische Anlage	0.12	0.12	0.00
Gebäudetechnik	Wassertechnische Anlage	0.42	0.42	0.00

Tabelle 5: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 661201. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Aus Tabelle 5 wird ersichtlich, dass sich die unterschiedliche Information bezüglich der Dämmung des Gebäudes in höheren Werten im Validierungsmodell widerspiegelt, in der Folge $r < 0$. Dies betrifft das Fundament und die Aussenwände unter und über Terrain. Zudem wird dem Gebäude im PACTA-Modul ein Schrägdach unterstellt, wohingegen im Validierungsmodell die Information eines Flachdaches angewendet wird. Dies führt im PACTA-Modul zu höheren Werten in der Dachkonstruktion und zu niedrigeren Werten in der Dachhaut. Ein weiterer Unterschied besteht in der Annahme des Vorhandenseins von Balkonflächen im PACTA-Modul, wohingegen ein entsprechender Indikator in den Baueingabedaten nicht gegeben ist und damit keine Balkonflächen zugerechnet werden. Da die Fensterflächen im PACTA-Modul mit 30% der Aussenwandfläche kleiner als die 35% im Validierungsmodell sind, ist zum einen der Beitrag der Fenster im PACTA-Modul niedriger, zum anderen der Beitrag aus der erhöhten Fläche der Aussenwand im PACTA-Modul höher. Unterschiede in den Vorarbeiten sind der geringfügig unterschiedlichen Dimensionierung der Bauteile unter Terrain zu schulden.

6.4.2.2 Gebäude ID 2627575

Für das Gebäude mit ID 2627575 sind die grauen Treibhausgasemissionen nach Bauelementgruppe für das PACTA- und Validierungsmodell und die relative Abweichung $r = E_{PACTA}/E_{Validierung} - 1$ in Tabelle 6 dargestellt. Aus den Baueingabedaten wird ersichtlich, dass es sich bei diesem Gebäude um einen Holzbau handelt, welcher zu einer geringeren Belastung durch graue Treibhausgasemissionen führt. Da das Validierungsmodell dies berücksichtigt, diese Information jedoch nicht in das PACTA-Modul einfließt, sind die Werte von gTHG-E des PACTA-Moduls für dieses Gebäude höher.

Gebäudeteil	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	2.93	3.00	-0.02
Gebäudehülle unter Terrain	4.87	4.33	0.13
Gebäudehülle über Terrain	4.12	3.40	0.21
Innen- und Aussenbauteile	4.68	3.10	0.51
Gebäudetechnik	1.38	1.38	0.00

Tabelle 6: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 2627575. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Tabelle 7 disaggregiert die Resultate weiter auf Bauteilebene. Es wird ersichtlich, dass die Unterschiede durch die Information über einen Holzbau, welche ausschliesslich im Validierungsmodell vorliegt, erklärt werden. Das PACTA-Modul hingegen rechnet mit Ersatzwerten für typische Baumaterialien, welche zu höheren Werten von gTHG-E als Holz führen.

Gebäudeteil	Element	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	Aushub	0.02	0.03	-0.02
Vorarbeiten	Baugrubenabschluss, Rühlwand	2.90	2.98	-0.03
Vorarbeiten	Pfählung, Mikrobohrpfahl	0.00	0.00	0.00
Gebäudehülle unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	1.77	1.77	0.00
Gebäudehülle unter Terrain	Aussenwand unter Terrain	2.35	1.80	0.30
Gebäudehülle unter Terrain	Dach unter Terrain	0.75	0.75	0.00
Gebäudehülle über Terrain	Aussenwandkonstruktion über Terrain	0.84	0.53	0.60
Gebäudehülle über Terrain	Äussere Wandbekleidung über Terrain	0.51	0.33	0.57
Gebäudehülle über Terrain	Fenster	1.31	1.58	-0.17
Gebäudehülle über Terrain	Dachkonstruktion	0.86	0.27	2.13
Gebäudehülle über Terrain	Dachhaut	0.60	0.70	-0.15
Innen- und Aussenbauteile	Innenwandkonstruktion, Wandbekleidung	1.43	1.43	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Geschossdecke	1.49	0.33	3.55
Innen- und Aussenbauteile	Bodenbelag, Deckenbekleidung	1.36	1.24	0.10
Innen- und Aussenbauteile	Balkon, Vordach	0.39	0.10	3.10
Gebäudetechnik	Elektroanlage	0.43	0.43	0.00
Gebäudetechnik	Wärmetechnische Anlage	0.41	0.41	0.00
Gebäudetechnik	Lufttechnische Anlage	0.12	0.12	0.00
Gebäudetechnik	Wassertechnische Anlage	0.42	0.42	0.00

Tabelle 7: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 2627575. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Die geringfügig unterschiedliche Dimensionierung der Volumina und Flächen unter Terrain zwischen den beiden Modellen führt zu den Unterschieden in den Werten von grauen Treibhausgasemissionen der Vorarbeiten. Grosse Unterschiede ergeben sich durch die Holzbauweise, welche zu einer tieferen gTHG-E im Validierungsmodell führt, wie an den Werten für die Bauelemente für Aussenwandkonstruktion unter und über Terrain, die äussere Wandbekleidung über Terrain, die Dachkonstruktion, die Geschossdecken, und den Bodenbelag ersichtlich wird. Die im PACTA-Modul als grösser angenommene Balkonfläche führt zu einem höheren Beitrag der Balkone. Der im Validierungsmodell mit 35% angenommene Fensteranteil führt zu einem höheren Beitrag der Fenster gegenüber dem PACTA-Modul, welches auf der Annahme von 30% basiert. Die im Validierungsmodell zusätzlich angenommenen Dachauskragung führt zu höheren Werten an gTHG-E in der Dachhaut verglichen mit dem PACTA-Modul.

6.4.2.3 Gebäude ID 2625064

Für das Gebäude mit ID 2625064 sind graue Treibhausgasemissionen nach Bauelementgruppe für das PACTA- und Validierungsmodell und die relative Abweichung $r = E_{PACTA}/E_{Validierung} - 1$ in Tabelle 8 dargestellt. Die Baueingabedaten zeigen, dass für dieses Gebäude sowohl eine Tiefgarage als auch ein Aussenparkplatz errichtet wurde. Aufgrund des letzteren wird die Fläche des Tiefgaragenvolumen im Validierungsmodell halbiert. Diese Anpassung wird im PACTA-Modul nicht vorgenommen. Somit führt das Validierungsmodell zu niedrigeren Werten an gTHG-E in den Vorarbeiten und dem Korpus unter Terrain. Eine weitere Differenz in der Gebäudehülle über Terrain entsteht aufgrund der abweichenden Annahmen der Dachform zwischen den Modellen.

Gebäudeteil	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	1.36	1.15	0.19

Gebäudehülle unter Terrain	3.94	2.41	0.64
Gebäudehülle über Terrain	2.54	3.08	-0.18
Innen- und Aussenbauteile	4.38	4.15	0.06
Gebäudetechnik	1.88	1.88	0.00

Tabelle 8: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 2625064.
Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Tabelle 9 disaggregiert die Resultate weiter auf Bauteilebene. Es wird ersichtlich, dass die Unterschiede der Dimensionierung der Tiefgarage und der Dachform sich in niedrigeren gTHG-E Werten im Gebäudeteil unter Terrain bzw. den Dachbeiträgen finden.

Gebäudeteil	Element	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	Aushub	0.025	0.016	0.52
Vorarbeiten	Baugrubenabschluss, Rühlwand	1.34	1.13	0.18
Vorarbeiten	Pfählung, Mikrobohrpfahl	0.00	0.00	0.00
Gebäudehülle unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	1.64	1.10	0.49
Gebäudehülle unter Terrain	Aussenwand unter Terrain	1.05	0.68	0.54
Gebäudehülle unter Terrain	Dach unter Terrain	1.25	0.63	1.00
Gebäudehülle über Terrain	Aussenwandkonstruktion über Terrain	0.57	0.55	0.04
Gebäudehülle über Terrain	Äussere Wandbekleidung über Terrain	0.35	0.33	0.04
Gebäudehülle über Terrain	Fenster	0.89	1.07	-0.17
Gebäudehülle über Terrain	Dachkonstruktion	0.43	0.37	0.15
Gebäudehülle über Terrain	Dachhaut	0.30	0.75	-0.60
Innen- und Aussenbauteile	Innenwandkonstruktion, Wandbekleidung	1.19	1.19	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Geschossdecke	1.49	1.49	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Bodenbelag, Deckenbekleidung	1.30	1.24	0.05
Innen- und Aussenbauteile	Balkon, Vordach	0.39	0.22	0.78
Gebäudetechnik	Elektroanlage	0.43	0.43	0.00
Gebäudetechnik	Wärmetechnische Anlage	0.41	0.41	0.00
Gebäudetechnik	Lufttechnische Anlage	0.62	0.62	0.00
Gebäudetechnik	Wassertechnische Anlage	0.42	0.42	0.00

Tabelle 9: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 2625064.
Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Die aufgrund des Aussenparkplatzes im Validierungsmodell nur zur Hälfte berücksichtigte Tiefgarage führt zu einem geringeren Aushub und Bauteilflächen für den Baugrubenabschluss, das Fundament und jeweils die Aussenwand und das Dach unter Terrain. Die Unterschiede in der Aussenwand über Terrain sind der abweichenden Annahme von 35% Fensteranteil im Validierungsmodell, jedoch nur 30% Fensteranteil im PACTA-Modul geschuldet. Dadurch ist die Aussenwandfläche im PACTA-Modul grösser, die Fensteranteile jedoch kleiner. Dies spiegelt sich in den Mengen an gTHG-E wider. Bezüglich Dachform nimmt das Validierungsmodell ein Flachdach an, das PACTA-Modul jedoch ein Schrägdach, wodurch die Unterschiede in den Bilanzen aus Dachkonstruktion und Dachhaut entstehen. Die Materialisierung der Böden gemäss Baueingabedaten im Validierungsmodell führt zu einem geringfügig kleineren Beitrag gegenüber dem PACTA-Modul. Die weitere Differenz zwischen den Balkonbeiträgen ist durch die unterschiedliche Annahme von 10% Stockwerksfläche im PACTA-Modul, jedoch 7 m² pro Wohneinheit im Validierungsmodell zu erklären.

6.4.2.4 Gebäude ID 2290391

Für das Gebäude mit ID 2290391 sind graue Treibhausgasemissionen nach Bauelementgruppe für das PACTA-Modul respektive das Validierungsmodell und die relative Abweichung $r =$

$E_{PACTA}/E_{Validierung} - 1$ in Tabelle 10 dargestellt. Bei diesem Gebäude handelt es sich um einen Holzbau, wobei diese Information nur über die Baueingabedaten im Validierungsmodell Eingang findet. Das PACTA-Modul hingegen rechnet mit Ersatzwerten bezüglich Materialisierung. Somit führt die Tragekonstruktion, Aussenwände⁷, Dachkonstruktion und Geschossdecken zu tieferen Bilanzen. Zusätzlich ist dem Validierungsmodell bekannt, dass es sich um ein gedämmtes Gebäude handelt, während das PACTA-Modul mit Ersatzwerten budgetiert. Des Weiteren führt die Berücksichtigung einer Dachauskrugung im Validierungsmodell zu höheren Bilanzen der Dachhaut. Ausserdem ist in dem Gebäude eine Solaranlage installiert.

Gebäudeteil	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	0.93	0.96	-0.03
Gebäudehülle unter Terrain	1.61	1.77	-0.09
Gebäudehülle über Terrain	3.35	3.24	0.04
Innen- und Aussenbauteile	4.48	3.13	0.43
Gebäudetechnik	2.00	2.01	-0.01

Tabelle 10: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 2290391. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Tabelle 11 disaggregiert die Resultate weiter auf Bauteilebene und zeigt, dass die Holzbauweise und das Vorhandensein einer Dämmung, welche beide im Validierungsmodell berücksichtigt werden, zu Abweichungen über diverse Bauelemente hinweg führt.

Gebäudeteil	Element	E_{PACTA} [kg/(a*m ²)]	$E_{Validierung}$ [kg/(a*m ²)]	r
Vorarbeiten	Aushub	0.01	0.01	-0.02
Vorarbeiten	Baugrubenabschluss, Rühlwand	0.92	0.95	-0.03
Vorarbeiten	Pfählung, Mikrobohrpfahl	0.00	0.00	0.00
Gebäudehülle unter Terrain	Fundament, Bodenplatte	0.75	0.93	-0.19
Gebäudehülle unter Terrain	Aussenwand unter Terrain	0.86	0.84	0.02
Gebäudehülle unter Terrain	Dach unter Terrain	0.00	0.00	0.00
Gebäudehülle über Terrain	Aussenwandkonstruktion über Terrain	0.76	0.47	0.60
Gebäudehülle über Terrain	Äussere Wandbekleidung über Terrain	0.46	0.71	-0.36
Gebäudehülle über Terrain	Fenster	1.17	1.41	-0.17
Gebäudehülle über Terrain	Dachkonstruktion	0.57	0.18	2.13
Gebäudehülle über Terrain	Dachhaut	0.40	0.46	-0.13
Innen- und Aussenbauteile	Innenwandkonstruktion, Wandbekleidung	1.27	1.27	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Geschossdecke	1.49	0.33	3.55
Innen- und Aussenbauteile	Bodenbelag, Deckenbekleidung	1.32	1.32	0.00
Innen- und Aussenbauteile	Balkon, Vordach	0.39	0.21	0.92
Gebäudetechnik	Elektroanlage	0.55	0.56	-0.03
Gebäudetechnik	Wärmetechnische Anlage	0.41	0.41	0.00
Gebäudetechnik	Lufttechnische Anlage	0.62	0.62	0.00
Gebäudetechnik	Wassertechnische Anlage	0.42	0.42	0.00

Tabelle 11: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 2290391. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Die Vorarbeiten weichen nur aufgrund der leicht unterschiedlichen Dimensionierung zwischen den Modellen voneinander ab. Grössere Unterschiede finden sich im Fundament, wobei das

⁷ Gemäss KBOB-Ökobilanzdaten und Norm SIA 2032:2020 werden in der Vorprojektphase die Innenwände über von Materialisierung unabhängige Werte bestimmt.

Validierungsmodell die Dämmung in Betracht zieht und damit höhere gTHG-E Werte aufweist. Die Aussenwand unter Terrain wird im PACTA-Modul grösser dimensioniert als im Validierungsmodell. Diese Zunahme der gTHG-E wird durch die Vernachlässigung der Information einer Dämmung fast vollständig kompensiert. Die Aussenwandkonstruktion und Aussenwandfläche über Terrain basieren beide auf einer Holzbauweise im Validierungsmodell, welche zu niedrigeren gTHG-E führt. Für die Aussenwandfläche kommt zu der Reduktion jedoch eine durch die Dämmung bedingte Erhöhung an gTHG-E hinzu, welche überwiegt und zu einer höheren Gesamtbilanz bezüglich Aussenwandfläche über Terrain im Validierungsmodell führt. Die Fensteranteile werden im PACTA-Modul mit 30% der Aussenwandfläche bemessen und in der Folge haben die Fenster eine tiefere Bilanz als im Validierungsmodell, welches auf der Annahme von 35% Fensteranteil beruht. Die Dachkonstruktion und Geschossdecken basieren im Validierungsmodell auf einer Holzbauweise, welche tiefere Bilanz aufweist als im PACTA-Modul. Die Dachhaut im Validierungsmodell ist durch die Annahme einer Dachauskrugung grösser dimensioniert und führt daher zu einer höheren Werten an gTHG-E. Die Balkonflächen im PACTA-Modul werden als 10% der Stockwerksflächen angenommen und sind somit grösser als die 7 m² pro Wohneinheit im Validierungsmodell. Dieser Unterschied zeigt sich in der höheren gTHG-E Werten für Balkone im PACTA-Modul. In der Gebäudetechnik ist die Grösse der Solaranlage zwar in beiden Modellen mit 40% der Dachhautfläche angenommen, aufgrund der Dachauskrugung im Validierungsmodell ist die Berechnungsbasis jedoch grösser. Dadurch ist die Fläche der Solaranlage im Validierungsmodell und somit deren Menge an gTHG-E grösser.

7 Schlussfolgerungen

Die Hochschule Luzern hat im Auftrag des Bundesamt für Umwelt (BAFU) ein unabhängiges Modell zur Berechnung der grauen Treibhausgasemissionen in der Erstellung, Transport und Entsorgung eines Gebäudes entwickelt. Dieses Modell wurde zur Validierung des Scope 3 Modells des PACTA-Klimatests herangezogen (in der Studie auch „PACTA-Modul“ genannt), welches als Resultat der Validierung hinsichtlich Modellannahmen und -parametern angepasst wurde.

Die Validierungsergebnisse haben gezeigt, dass das finale PACTA-Modul eine hohe Güte aufweist, auch im Falle fehlender Detailinformationen über die verbauten Materialien. Der stärkste Einflussfaktor für die grauen Treibhausgasemissionen eines Gebäudes aus Erstellung, Transport und Entsorgung ist die Gebäudekubatur. Insbesondere die zusätzliche Errichtung einer Tiefgarage erhöht die grauen Treibhausgasemissionen im Mittel um rund 20%.

Grössere Gebäude haben somit zwar im Absoluten höhere Werte an grauen Treibhausgasemissionen, relativ zur Wohnfläche kommt es jedoch zu Effizienzgewinnen. Die Menge an grauen Treibhausgasemissionen, die für einen Quadratmeter in grösseren Gebäuden anfällt, ist tendenziell tiefer als die notwendige Menge in kleineren Gebäuden. Dies gilt zumindest bis zu einer gewissen Gebäudegrösse, da bei sehr grossen Gebäuden die Notwendigkeit von massiveren Tragekonstruktionen dieser Effizienzsteigerung entgegen wirkt. Letzterer Effekt kann aufgrund der aktuellen Datenlage nicht quantifiziert werden, zukünftige Erweiterungen der KBOB-Ökobilanzdaten im Baubereich werden dies voraussichtlich erlauben.

Der Einfluss verschiedener Baumaterialien auf die grauen Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Transport und Entsorgung liegt in der Grössenordnung von +/- 20%, wobei speziell eine Holzbauweise zu einer Reduktion, die Verwendung hoher Anteile von Glas und Metall zu einer Zunahme führen. Als Alternative können Strategien, die auf Sanierung und Wiederverwendung bestehender Substanzen beruhen, einen sehr wichtigen Beitrag zur Reduktion der grauen Treibhausgasemissionen und deren Umweltauswirkungen von Bauprojekten leisten.

Der Einbau einer Dämmung, Photovoltaik- oder Erdwärmeanlage führt zu höheren grauen Treibhausgasemissionen aus Erstellung, Transport und Entsorgung, diese werden jedoch durch die Ersparnisse im Betrieb überkompensiert.

Die Betrachtung der grauen Treibhausgasemissionen gewinnt derzeit an Bedeutung, da über die angenommene Nutzungsdauer des Gebäudes die jährlichen Emissionen für energetisch optimierte Gebäude etwa gleich gross sind wie jene, die durch den Betrieb entstehen. Für die Netto-Null Zielerreichung bis 2050, wie dies mit dem Klima- und Innovationsgesetz angestrebt wird (UVEK, 2023), wird somit der Miteinbezug der Grauen Energie immer wichtiger, insbesondere bei Neubauten sowie bei bestehenden Bauten, sobald ein Entscheid zwischen Sanierung und Abriss ansteht.

Die Ergebnisse aus dem PACTA-Modul sind mit hoher Genauigkeit mit jenen aus dem Validierungsmodell vergleichbar, wobei geringfügige Unterschiede durch leicht abweichende

Annahmen zwischen den beiden Modellen erklärt werden können. Dies bekräftigt die Güte des PACTA-Moduls und dessen Zweckmässigkeit für den PACTA Klimatest 2024.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Histogramm der grauen Treibhausgasemissionen [$\text{kg}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] und der nicht-erneuerbaren Primärenergie [$\text{kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] jeweils pro Jahr und Energiebezugsfläche der Projekte der Stichprobe gemäss Datenquelle Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	20
Abbildung 2: Histogramm der grauen Treibhausgasemissionen (gTHG-E) [$\text{kg}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] und der nicht-erneuerbaren Primärenergie (PEne) [$\text{kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] jeweils pro Jahr und Energiebezugsfläche nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	21
Abbildung 3: Verteilungen der grauen Treibhausgasemissionen (gTHG-E) [$\text{kg}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] und der nicht-erneuerbaren Primärenergie (PEne) [$\text{kWh}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] nach Gebäudegrösse und Nutzungstyp. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	22
Abbildung 4: Verteilungen der prozentuellen Beiträge zu grauen Treibhausgasemissionen [$\text{kg}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] nach Nutzung. Tiefgaragenbeiträge werden separat und in Proportion zur Gesamtemission des Gebäudes ausgewiesen. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	22
Abbildung 5: Vergleich der Verteilungen der prozentuellen Beiträge zu grauen Treibhausgasemissionen [$\text{kg}/(\text{a} \cdot \text{m}^2 \text{ EBF})$] für MFH mit einem Referenzgebäude (ohne Tiefgaragenbeitrag). Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023; SIA 2032:2021 (Faktorverlag).	24
Abbildung 6: Vergleich der Verteilungen der grauen Treibhausgasemissionen und der nicht-erneuerbaren Primärenergie jeweils pro Jahr und Energiebezugsfläche aus Detail- und Grobmodell. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023. ..	25
Abbildung 7: Vergleich der Verteilungen der grauen Treibhausgasemissionen aus Detail- und Grobmodell nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	26
Abbildung 8: Vergleich der Verteilung der relativen Abweichung der grauen Treibhausgasemissionen und der nicht-erneuerbaren Primärenergie aus dem Detail- zum Grobmodell. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	27
Abbildung 9: Verhältnis der grauen Treibhausgasemissionen und der nicht-erneuerbaren Primärenergie des Detailmodells zu einem identischen Gebäude ohne Berücksichtigung der Tiefgarage. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	28
Abbildung 10: (y-Achse beschränkt) Einfluss der Informationen zu Baumaterialien auf graue Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbare Primärenergie. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	29
Abbildung 11: Einfluss von Holzelementen auf graue Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbare Primärenergie. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	30

Abbildung 12: Einfluss der Gebäudedämmung auf graue Treibhausgasemissionen und nicht-erneuerbare Primärenergie. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	30
Abbildung 13: Verteilung des prozentuellen Anstiegs in grauen Treibhausgasemissionen durch Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	31
Abbildung 14: Verteilung des prozentuellen Anstiegs in nicht-erneuerbarer Primärenergie durch Photovoltaik- und Erdwärmeanlagen nach Nutzung. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	32
Abbildung 15: Verteilung der Wohnungsgrößen in m ² für EFH und MFH. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media Schweiz GmbH	50
Abbildung 16: Verhältnis des Medianvolumens für Gebäude mit Tiefgarage zum Medianvolumens für Gebäude ohne Tiefgarage nach Nutzung und Anzahl Wohnungen im Bauprojekt. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	54
Abbildung 17: Skalierungsverhalten der grauen Treibhausgasemissionen pro Jahr in Abhängigkeit von Stockwerksfläche für ein Beispielgebäude, im Total und nach Bauelement. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.....	66
Abbildung 18: Skalierungsverhalten der grauen Treibhausgasemissionen pro Jahr und Energiebezugsfläche in Abhängigkeit von Stockwerksfläche für ein Beispielgebäude, im Total und nach Bauelement. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebäudestruktur gemäss Norm SIA 2032:2020.....	17
Tabelle 2: Beschreibung der Stichprobe zum Vergleich PACTA-Modul und Validierungsmodell. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.....	33
Tabelle 3: Resultate für graue Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter Energiebezugsfläche aus Validierungs- und PACTA-Modul und deren relative Abweichung ($r = \frac{EPACTA}{EValidierung} - 1$). Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	36
Tabelle 4: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 661201. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023....	36
Tabelle 5: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 661201. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.....	37
Tabelle 6: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 2627575. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	37
Tabelle 7: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 2627575. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.....	38
Tabelle 8: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 2625064. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	39
Tabelle 9: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 2625064. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.....	39
Tabelle 10: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil für Gebäude ID 2290391. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.	40
Tabelle 11: Vergleich grauer Treibhausgasemissionen nach Gebäudeteil und Element für Gebäude ID 2290391. Datenquelle: PACTA-Modul, Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.....	40
Tabelle 12: Modellbezogene Baueingabedaten aus Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media Schweiz GmbH.....	48
Tabelle 13: KBOB-Ökobilanzdaten und Baueingabeindikatoren zu Materialisierung von einzelnen Bauelementen. Datenquelle: (KBOB, 2023).....	64

9 Literaturverzeichnis

- BFS. (28. November 2023). Eidgenössisches Gebäude- und Wohnungsregister. Von <https://www.housing-stat.ch/de/index.html> abgerufen
- energytools. (16. Dezember 2020). <https://www.energytools.ch/>. Abgerufen am 21. Juli 2023 von <https://www.energytools.ch/index.php/de/downloads/datenbanken/download/4-datenbanken/71-2032-graue-energie>
- KBOB. (20. Juli 2023). kbob.admin.ch. Abgerufen am 21. Juli 2023 von https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html:
https://www.kbob.admin.ch/dam/kbob/de/dokumente/Themen%20und%20Trends/nachhaltiges_bauen/Oekobilanzdaten_%20Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_v3.0.xlsx.download.xlsx/Oekobilanzdaten_%20Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_
- SIA. (01. August 2020). SIA 2032:2020, Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden. *Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden*. Schweizerischer Architekten- und Ingenieursverein.
- UVEK. (18. Juni 2023). *Klima- und Innovationsgesetz*. Abgerufen am 20. Februar 2024 von <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/klima-und-innovationsgesetz.html>

10 Anhang

Die Abschnitte des Anhangs enthalten technische Details zur Datenaufbereitung, dem Gebäudemodell und der Anwendungen der KBOB-Ökobilanzdaten respektive deren Ersatzwerte.

10.1 Datenaufbereitung Baueingabedaten

10.1.1 Datenbeschreibung Baueingabedaten

Die wie in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen, verwendeten Daten und deren Verwendung im Scope 3 Modell werden in Tabelle 12 dargestellt.

Attributbeschreibung	Verwendung in Modell «Scope 3»
Identifikator für Bauprojekt	Projektindex i
Bauaktivität (Anbau, Neubau, Umbau innen, Umbau aussen, Abbruch)	Stichprobenkonstruktion (nur Neubauprojekte)
Datum der Baubewilligung	Stichprobenkonstruktion
Projektvolumen (m ³)	Variable V_P^i
Geschossfläche Stockwerke über Terrain	Variable F_G^i
Stockwerksanzahl über Terrain	Variable F_+^i
Anzahl Wohnungen in Bauprojekt	Variable W_P^i
Projektkosten (mCHF)	Ersatzwertschätzung, Variable K_P^i
Gebäudetyp	Stichprobenkonstruktion (EFH, MFH, Mischnutzung)
Tiefgarage	Indikatorvariable I_{TG}^i
Aussenparkplatz	Indikatorvariable I_{PP}^i
Photovoltaische Anlage	Indikatorvariable I_{PV}^i
Erdwärmetechnische Anlage	Indikatorvariable I_{EW}^i
Lufttechnische Anlage	Indikatorvariable I_L^i
Balkone	Indikatorvariabel I_B^i
Dachform	Indikatorvariablen I_{DF}^i (Flachdach) und I_{DS}^i (Schrägdach)
Dämmung	Indikatorvariable I_D^i
Betonwand	Indikatorvariable $I_{Betonwand}^i$
Backsteinwand	Indikatorvariable $I_{Backsteinwand}^i$
Holz wand	Indikatorvariable $I_{Holzwand}^i$
Einsteinmauerwerk	Indikatorvariable $I_{Einsteinmauer}^i$
Stützenraster (zu Fassadensystem)	Indikatorvariable $I_{Stützenraster}^i$
Holz fassade	Indikatorvariable $I_{Holzfassade}^i$
Faserzementfassade	Indikatorvariable $I_{Faserzementfassade}^i$
Metallfassade	Indikatorvariable $I_{Metallfassade}^i$
Glasfassade	Indikatorvariable $I_{Glasfassade}^i$
Holzdachkonstruktion	Indikatorvariable $I_{Holzdach}^i$
Holzdecke	Indikatorvariable $I_{Holzdecke}^i$
Unterlagsboden	Indikatorvariable $I_{Unterlagsboden}^i$
Doppelboden, Hohlraumboden	Indikatorvariable $I_{Doppelboden}^i$

Tabelle 12: Modellbezogene Baueingabedaten aus Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media Schweiz GmbH

10.1.2 Variablenaufbereitung Baueingabedaten

10.1.2.1 Indikatoren zu Gebäudetyp und -nutzung

Die Bauprojekte werden nach Nutzung unterschieden, wobei drei Indikatorvariablen eingeführt werden, die jeweils auf Ebene des Objekts i gegeben sind. I_{EFH}^i identifiziert Einfamilienhaus-Bauprojekte, zu denen ausschliesslich Gebäudetypen Einfamilienhäuser, Doppel-Einfamilienhäuser, Ferienhäuser, Bauernhäuser, Reihenhäuser und Einfamilienhaus-Siedlungen zählen. I_{MFH}^i identifiziert Mehrfamilienhaus-Bauprojekte, zu denen ausschliesslich Gebäudetypen Mehrfamilienhäuser, Terrassenhäuser, Wohnungen, Lofts, Behelfswohnungen, Alterswohnungen und Alters-Siedlungen. I_{MIX}^i identifiziert Bauprojekte, in denen sowohl Gebäudetypen der Einfamilienhaus- als auch der Mehrfamilienhausprojekte vorkommen. Diese Kategorie dient zur Disaggregation der Bauprojekte in individuelle Gebäude, da die Granularität des Modells zur Berechnung der Grauen Energie auf Stufe Gebäude gegeben ist. Zur Rapportierung der Grauen Energie auf Bauprojektenebene werden die Beiträge individueller Bauten gemäss Gebäudemultiplizität aggregiert, siehe Abschnitt 4.1.1.1.

10.1.2.2 Variablen zur Gebäudedimensionierung

Das Projektvolumen, V_P^i , in m^3 eines Bauprojekts i kann den Baueingabedaten entnommen werden, jedoch gibt es Einträge mit fehlenden Werten für das Volumen. In diesem Fall müssen Projekt- bzw. Gebäudevolumen anhand anderer Attribute geschätzt werden. Die geschieht über ein zweifaches Ersatzverfahren. Zunächst wird das Volumen aus der Anzahl der Wohnungen im Projekt, deren durchschnittlichen Grösse und unter der Annahme einer bestimmten Stockwerkshöhe, h_{STW} , geschätzt. Sollten auch Angaben zur Wohnungsanzahl fehlen, werden die Projektkosten zur Konstruktion eines weiteren Ersatzwerts für die Wohnungsanzahl hinzugezogen. Die Schritte werden in den folgenden Abschnitten weiter ausgeführt.

Bauprojekte mit fehlendem Volumen aber gegebener Wohnungszahl, W_P^i , wird der Ersatzwert (Fallback) für das Volumen, $V_{P,FB}^i$, über das Produkt aus durchschnittlicher Wohnungsgrösse (unterschieden nach EFH und MFH), \bar{A}_W^i , Wohnungsanzahl und dem Modellparameter für die Stockwerkshöhe, h_{STW} , geschätzt:

$$V_{P,FB}^i = W_P^i \cdot \bar{A}_W^i \cdot h_{STW}$$

Die durchschnittliche Wohnungsgrösse in m^2 , \bar{A}_W^i , wird hierbei aus Baueingabedaten zu Projekten in der Stichprobe, für welche die Geschossfläche F_G^i gegeben ist, geschätzt. Hierbei wird zwischen Einfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern unterschieden aufgrund des typischen Flächenverbrauchs. Abbildung 15 zeigt die Verteilung der Wohnungsgrössen in m^2 für Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser.

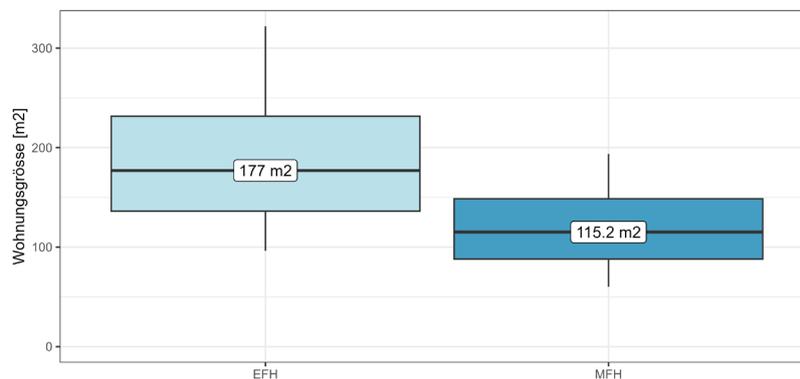


Abbildung 15: Verteilung der Wohnungsgrössen in m² für EFH und MFH. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media Schweiz GmbH

Da die Stichprobe ausschliesslich Neubauten aus den Jahren 2009-2023 umfasst, liegen diese Werte über der Schweizer Durchschnitt. Für die Anwendung auf Neubauten desselben Zeitraums sind diese Werte jedoch zweckmässig, da Konsistenz zwischen Schätzung und Anwendung gegeben ist. Abbildung 15 zeigt den Median der Grösse einer Wohnung eines Einfamilienhauses respektive Mehrfamilienhauses der Stichprobe. Der Median wird als Schätzer verwendet, wobei Projekte mit gemischten Nutzungen identisch MFH-Projekten geschätzt werden:

$$\bar{A}_W^i = I_{EFH}^i \cdot 177 + (I_{MFH}^i + I_{MIX}^i) \cdot 115.2$$

Für Bauprojekte, für die weder Volumen noch Wohnungsanzahl gegeben sind, muss vorgängig zur beschriebenen Ersatzwertschätzung ein zusätzlicher Ersatzwert für die Wohnungsanzahl, $W_{P,FB}^i$, angewendet werden. Dieser Ersatzwert wird in Abhängigkeit von Nutzungstyp und den Baukosten, K_P^i , gebildet. Für Einfamilienhäuser wird die Annahme von lediglich einer Wohnung getroffen. Für Mehrfamilienhäuser wird die Anzahl Wohnungen über die Annahme, dass die Errichtung einer Wohneinheit CHF 500'000 kostet, geschätzt. Projekte mit gemischter Nutzung werden wie MFH-Projekte genähert. Somit ergibt sich für den Ersatzwert

$$W_{P,FB}^i = I_{EFH}^i + (I_{MFH}^i + I_{MIX}^i) \cdot \left\lfloor \frac{K_P^i}{0.5} \right\rfloor$$

Die Funktion $\lfloor \cdot \rfloor$ ist die Abrundungsfunktion, es wird somit jeweils nur jene Anzahl an Wohnungen berücksichtigt, für die pro Wohnung ein Betrag von mindestens CHF 500'000 budgetiert wurde.

Die Projektkosten K_P^i sind in der Einheit CHF Mio. Die Anzahl der Stockwerke über Terrain, F_G^i , ist als Attribut in den Baueingabedaten verfügbar. Dieses bezieht sich auf lediglich ein Gebäude im Bauprojekt, besonders im Falle mehrerer ähnlicher EFH in Einfamilienhaus-Siedlungen. Für fehlende Werte wird ein Ersatzwert, $F_{G,FB}^i$, anhand des Medians der Stockwerksanzahl innerhalb eines Nutzungstyps nach den über Terzile der Wohnungsanzahl kategorisierten Gebäudegrössen angenommen. Für EFH beläuft sich der Ersatzwert auf $F_{G,FB}^i = 2$ Stockwerke über Terrain. Für MFH ergibt sich der Ersatzwert als $F_{G,FB}^i = 3$ für Gebäude bis 11 Wohnungen, bzw. auf $F_{G,FB}^i = 4$ für Gebäude mit einer höheren Anzahl an Wohneinheiten. Für gemischte

Nutzungstypen wird bis zu einer Wohnungsanzahl von 3 Wohnungen der Ersatzwert von 2, darüber einer von 3 Stockwerken über Terrain angenommen. Fehlende Werte in der Stichprobe werden ersetzt.

10.1.2.3 Indikatoren zu Bauform und Ausführung

Aus den Baueingabedaten Indikatorvariablen werden Indikatorvariablen, welche Bauform und Ausführung eines Bauprojekts i betreffen, extrahiert. Der Indikator I_{TG}^i zeigt an, ob eine Tiefgarage im Zuge des Projekts erstellt wird. Der Indikator $I_{Parkplatz}^i$ zeigt die Erstellung eines überirdischen Aussenparkplatzes an. Der Indikator I_{PV}^i zeigt das Vorhandensein einer photovoltaischen Anlage an. Der Indikator I_{EW}^i zeigt den Einbau einer erdwärmetechnischen Anlage an. Der Indikator I_L^i ist für Projekte mit Lüftungsanlagen zusätzlich zu Bad und Küche ausgeprägt. Der Indikator I_B^i informiert über die Konstruktion von Balkonen im Gebäude. Die Indikatorvariablen I_{DF}^i und I_{DS}^i geben Auskunft über eine flache und schräge Dachform.

Da nicht alle Bauprojekte Wertangaben für die jeweiligen Indikatorvariablen haben, werden folgende Annahmen bezüglich Ersatzwerten gemacht: Für I_{TG}^i , I_{PP}^i , I_{PV}^i , I_{EW}^i , I_B^i wird für einen nicht-angegeben Eintrag in den Baueingabedaten der Ersatzwert 0 gewählt unter der Annahme, dass das jeweilige Element nicht gegeben ist. Für die lufttechnischen Anlagen I_L^i wird die Annahme getroffen, dass bei fehlender Angabe in den Baueingabedaten, Einfamilienhausprojekte nicht über eine gesamtumfängliche Lüftung verfügen, für Mehrfamilienhaus- und gemischte Projekte eine solche jedoch verbaut wird. Die Ersatzwerte für Dachformen unterscheiden ebenfalls nach dem Gebäudetyp. Falls explizit eine eindeutige Information zur Dachform aus den Baueingabedaten entnommen werden kann, wird dieser Wert angewendet. Falls das Bauprojekt in den Daten jedoch keine Angaben zu Dachform enthält, oder, im seltenen Fall, dass beide Dachformen gegeben sind, werden folgende Ersatzwerte angewendet: Für Einfamilienhäuser wird per Annahme ein Schrägdach, für Mehrfamilienhäuser und gemischte Bauprojekte ein Flachdach unterstellt.

10.1.2.4 Indikatoren zu Dämmung und Materialisierung

Weitere Indikatorvariablen werden für die Materialisierung des Gebäudes erstellt. Detailinformationen, die mit den KBOB-Ökobilanzdaten harmonisiert und damit im Modell angewendet werden können, beziehen sich auf Dämmung, Tragekonstruktion, Fassade und Böden im Bauprojekt i . Der Indikator I_D^i zeigt an, dass das Gebäude gedämmt ist. Hierin nimmt das Modell an, dass im Fall eines gedämmten Bauteils das gesamte Gebäude gedämmt ist. Somit ist der Indikator ausgeprägt, falls die Baueingabedaten eine Dämmung hinsichtlich Fundaments, Aussenwand, Dachhaut oder Böden ausweisen. Weitere Indikatoren beziehen sich auf die Materialisierung der Aussenwandkonstruktion, mit einer jeweiligen Ausprägung in $I_{Betonwand}^i$ für eine Betonwand, $I_{Backsteinwand}^i$ für eine Backsteinwand, $I_{Holzwand}^i$ für eine Holzwand, $I_{Einsteinmauer}^i$ für Einsteinmauerwerk, $I_{Stützenraster}^i$ für ein zusätzliches Stützenraster zum Fassadensystem. Ein weiterer Satz an Indikatoren bezieht sich auf die Materialisierung der Fassade. $I_{Holzfassade}^i$, $I_{Faserzementfassade}^i$, $I_{Metallfassade}^i$ bzw. $I_{Glasfassade}^i$ zeige jeweils das Vorhandensein der Materialien Holz, Faserzement, Metall und Glas in der Fassade. Da KBOB-Ökobilanzdaten lediglich die Kombination aus Metall- und Glasfassade erlauben, wird in der Folge der Indikator $I_{Metall/Glasfassade}^i$ erzeugt: dieser zeigt an, ob mindestens einer der Indikatoren $I_{Metallfassade}^i$ oder $I_{Glasfassade}^i$ eine Ausprägung für das Bauprojekt i ausweist.

Bauprojekte können mehr als eine Ausprägung in den Indikatoren zur Materialisierung für Tragekonstruktion und Fassade haben. Da aus den Baueingabedaten keine Anteile der jeweiligen Materialien extrahiert werden können, geht das Modell per Annahme von einer Gleichverteilung der Bauteildimensionierung über die enthaltenen Materialien aus.

Bezüglich Materialisierung der Dächer ist in Baueingaben eine Holzkonstruktion vermerkt, die durch den Indikator $I_{Holzdach}^i$ wiedergegeben wird. Dasselbe gilt für Geschossdecken, wo der Indikator $I_{Holzdecke}^i$ die vollständige Materialisierung mit Holz indiziert.

Indikatoren für spezielle Böden werden durch $I_{Untertagsboden}^i$ und $I_{Doppelboden}^i$ aus den Baueingabedaten konstruiert.

10.1.3 Datenqualitätsbereinigung

Projekte mit mehr als 37 Stockwerken in einem Gebäude werden ausgeschlossen. Weiters werden Projekte, deren Volumen im höchsten 1%-Quantil der Stichprobe liegen, durch Ersatzwerte für das Volumen gemäss Abschnitt 10.1.2.2 bereinigt. Dies betrifft EFH-Projekte mit Volumina grösser als 7884 m³, und MFH- bzw. gemischte Projekte mit Volumina grösser als 58831 m³. Projekte mit einer Apartmentanzahl von 0 oder kleiner werden ausgeschlossen. Die Energiebezugsfläche des Gebäudes muss mindestens 50 m² betragen, die Energiebezugsfläche jeder Wohnung muss mindestens 25 m² betragen, andere Projekte werden aus der Stichprobe ausgeschlossen. Die Stockwerksfläche für ein Stockwerk muss für mindestens 25 m² für EFH, und mindestens 50 m² für MFH und gemischte Projekte betragen. Weiters werden Projekte mit Stockwerksflächen, welche über dem 0.5%-Quantil der Stichprobe (>1958 m²) ausgeschlossen.

10.2 Gebäudemodell

Dieser Abschnitt enthält ergänzend zum Hauptteil rechnerische Details zum Gebäudemodell und dessen Implementierung.

10.2.1 Kubatur und Gebäudeform

10.2.1.1 Gebäudemultiplizität in Baueingabeprojekten

Die Granularität der Baueingabedaten ist auf Stufe Bauprojekt, welches die Errichtung mehrerer Gebäude umfassen kann. Das PACTA-Modul für Scope 3 hingegen berechnet die Graue Energie auf der niedrigeren Granularitätsstufe Gebäude. Es müssen daher Annahmen für die Disaggregation der Baueingabedaten getroffen werden, basierend auf der Anzahl der Wohnungen und der Nutzung. Es wird unterschieden zwischen Einfamilienhaus- (EFH), Mehrfamilienhaus- (MFH) und Mischprojekten. Bei Letzteren handelt es sich um Projekte, die sowohl EFH als auf MFH enthalten.

Bei EFH-Projekten mit einer Wohnung besteht keine Ambiguität, da es sich um die Errichtung eines einzelnen Gebäudes handelt. Bei EFH-Projekten mit mehreren Wohnungen wird die Annahme getroffen, dass diese Gebäude separat voneinander und in der Bauweise identisch

sind. Die Angaben der Baueingabedaten hinsichtlich Volumina beziehen sich auf das gesamte Bauprojekt, die Stockwerksanzahl jedoch auf eines der meist ähnlichen Gebäude der Siedlung. Das Gebäudemodell berechnet anhand dieser Angaben ein Gebäude und bewertet die Graue Energie des Bauprojekts final durch die Multiplizität des Gebäudes im Projekt, n^{EFH} , welche der Anzahl der Gebäude im Projekt gemäss Baueingabedaten entspricht. Diese entspricht für EFH der Anzahl der Wohnungen im Projekt i , W_p^i , wobei die Ersatzwerte gemäss Abschnitt Anhang 10.1.2.2 angewendet wurden.

Für MFH-Projekte ist die Multiplizität der Gebäude aus den Baueingabedaten nicht ersichtlich. Somit wird die Annahme getroffen, dass es sich um nur ein Gebäude handelt, daher ist $n^{MFH} = 1$. Da das Volumen jeweils auf das gesamte Projekt gegeben ist, würde das Volumen korrekt reflektiert, jedoch auf nur ein grösseres Gebäude, anstatt auf mehrere, kleinere Gebäude im Falle einer Multiplizität grösser als 1 aufgeteilt werden.

Für fehlende Werte wird der Ersatzwert 1 für die Gebäudemultiplizität angenommen. Das Gebäudemodell wendet daher für die Multiplizität für Projekt i folgende Relation an

$$n^i = 1 + I_{MFH}^i \cdot (n^{MFH} - 1) + I_{EFH}^i \cdot (W_p^i - 1)$$

10.2.1.2 Tiefgaragengrösse

Die Berechnung der Kubatur im Gebäudemodell basiert auf den Baueingabedaten zum Gebäudevolumen. Dieses Merkmal umfasst Gebäudevolumina inklusiver etwaiger Tiefgaragen. Zunächst werden die Anteile der Tiefgaragen geschätzt. Hierzu werden die Gebäude der Stichprobe nach den Charakteristika Nutzung (Einfamilienhaus oder Mehrfamilienhaus), Anzahl der Wohnungen im Gebäude und Vorhandensein einer Tiefgarage kategorisiert, wobei Projekte mit Aussenparkplatz ausgeschlossen werden, da in diesen Projekten die Tiefgarage tendenziell kleiner ist. Die Schätzung der Tiefgaragenvolumina erfolgt durch den Vergleich der Verteilung der Volumina von Gebäuden mit bzw. ohne Tiefgarage innerhalb einer Nutzungskategorie und für dieselbe Anzahl an Wohnungen im Gebäude. Da die Granularitätsstufe der Baueingabedaten das Bauprojekt ist, können in einem Projekt auch mehrere Gebäude enthalten sein. Es kommen somit auch Einfamilienhausprojekte mit mehr als einer Wohnung vor. Hier handelt es sich um mehrere Einfamilienhäuser in einer Siedlung. Da die Tiefgarage in derartigen Siedlungen oftmals geteilt wird, erfolgt die Schätzung der Tiefgaragenanteile auch unter Miteinbezug von Siedlungen. Um eine ausreichende Stichprobengrösse für die statistische Schätzung des Medians der jeweiligen Kohorte zu erzielen, werden für Einfamilienhausprojekte nur jene mit maximal 12 Wohnungen, für Mehrfamilienhausprojekte nur jene mit maximal 25 Wohnungen in Betracht gezogen. Die Schätzung basiert auf dem Verhältnis des Medianvolumens für Gebäude mit Tiefgarage zum Medianvolumens für Gebäude ohne Tiefgarage für die jeweilige Kohorte, siehe Abbildung 16.

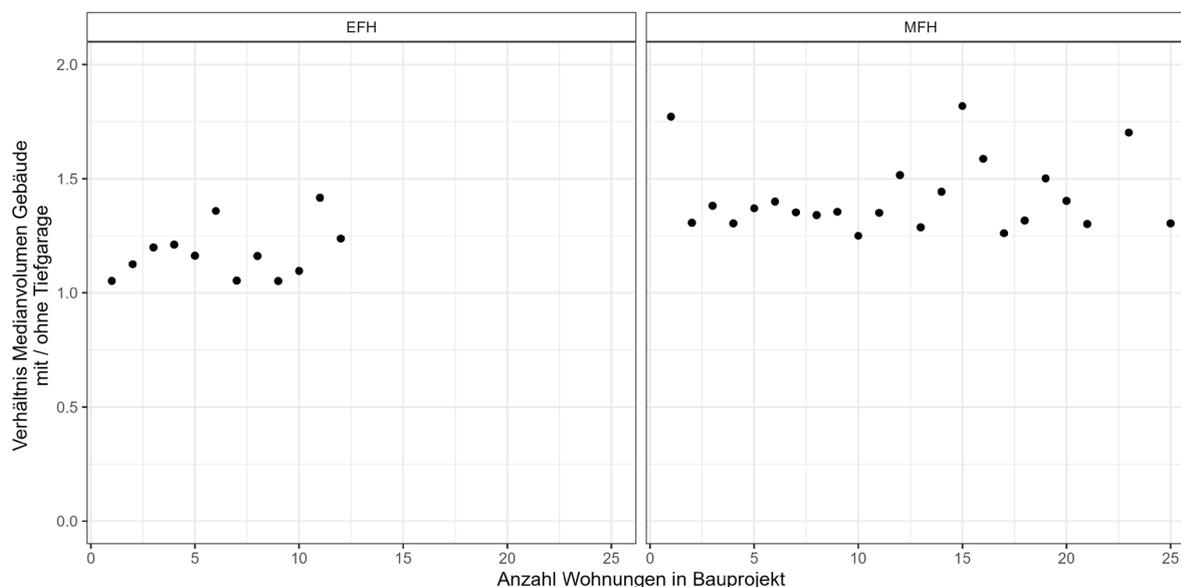


Abbildung 16: Verhältnis des Medianvolumens für Gebäude mit Tiefgarage zum Medianvolumens für Gebäude ohne Tiefgarage nach Nutzung und Anzahl Wohnungen im Bauprojekt. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Der geschätzte Volumensanteil der Tiefgarage wird durch den Mittelwert der berechneten Verhältnisse der Medianwerte in Abbildung 16 bestimmt. Für Ein- und Mehrfamilienhäuser betragen diese Werte 1.18 und 1.48. Ausgehend von der Gebäudekubatur wird somit ein zusätzliches Volumen von 18% für Einfamilienhäuser und 48% für Mehrfamilienhäuser geschätzt. Im Gebäude werden diese Schätzungen auf den nächsten Wert gemessen in 25% Schritten aufgerundet. Im Gebäudemodell kommen somit die Parameterwerte $\hat{\alpha}_{TG}^{EFH} = 25\%$ für Einfamilienhäuser und $\hat{\alpha}_{TG}^{MFH} = 50\%$ für Mehrfamilienhäuser bzw. Gemischtnutzungen (EFH und MFH im gleichen Bauprojekt) zur Anwendung. Diese Parameter wurden vom Departement für Technik & Architektur geprüft und als zweckmässig bewertet.

In der Anwendung auf Baueingabedaten wird die Skalierung für Gebäude angewendet, für welche der Indikator I_{TG}^i gegeben ist, siehe Abschnitt 3.1.3.2.2. Für Gebäude ohne Tiefgaragen wird daher keine Reskalierung (Skalierung mit Wert 1) vorgenommen. Die im Gebäudemodell angewendete Skalierung, α_{TG}^i , der Gebäude- und Tiefgaragenvolumen für Projekt i erfolgt somit über

$$\alpha_{TG}^i = 1 + I_{TG}^i \cdot (I_{EFH}^i \cdot \hat{\alpha}_{TG}^{EFH} + I_{MFH}^i \cdot \hat{\alpha}_{TG}^{MFH} - 1)$$

10.2.1.3 Gebäude- und Tiefgaragenvolumen

Das für das Wohngebäude ohne Tiefgarage zur Verfügung stehende Volumen V_G^i ist gegeben durch:

$$V_G^i = \frac{V_P^i}{\alpha_{TG}^i \cdot n^i},$$

wobei Index i das Projekt identifiziert, V_P^i das Volumen des Bauprojekts (inkl. Tiefgarage) ist und der Tiefgaragenskalierungsfaktor α_{TG}^i in Anhang 10.2.1.2 beschrieben wird. Bauprojekte mit gemischten Gebäudetypen werden nach gleicher Methode wie MFH behandelt. Für die Berechnung der Grauen Energie ausschlaggebend ist somit das Volumen eines Wohngebäudes

im Projekt. In der späteren Anwendung des Modells wird die Graue Energie dieser Gebäude entsprechend der Multiplizität n^i skaliert, sodass die Graue Energie auf Granularitätsstufe des Projekts ausgewiesen werden kann.

Das Tiefgaragenvolumen, V_{TG}^i , des Projekts ist somit der verbleibende Anteil Projektvolumens. Für den Fall, dass zusätzlich zu einer Tiefgarage, I_{TG}^i , für Projekt i , auch ein Aussenparkplatz über Terrain, I_{PP}^i , gegeben ist, siehe Abschnitt 3.1.3.2.2, wird das Tiefgaragenvolumen nur zur Hälfte angerechnet

$$V_{TG}^i = \frac{V_P^i}{n^i} \cdot \frac{\alpha_{TG}^i - 1}{\alpha_{TG}^i} \cdot (1 - 0.5 \cdot I_{PP}^i)$$

Wo das Merkmal Volumen in den Baueingabedaten fehlt, wird ein Ersatzwert wie in Anhang 10.1.2.2 ausgeführt. Die Tiefgarage wird im Gebäudemodell als separater Bau unter Terrain betrachtet, welcher nicht unter dem Wohngebäude liegt. Dadurch wird die Fläche der Tiefgarage vollständig als zusätzliche Decke unter Terrain gezählt.

10.2.1.4 Stockwerksanzahl

Die Anzahl der Stockwerke über Terrain eines Gebäudes i , F_+^i , ist aus den Baueingabedaten im Attribut *STOREYS* ersichtlich. Für die Stockwerksanzahl unter Terrain, F_-^i , werden folgende Annahmen getroffen: Falls $F_+^i < 5$ Stockwerken liegt, wird $F_-^i = 1$ Stockwerk angenommen, für $F_+^i \geq 5$ ist per Annahme $F_-^i = 2$. Diese Annahmen wurden durch das Departement Technik & Architektur der Hochschule Luzern geprüft und als zweckmässig befunden.

10.2.1.5 Geschossfläche

Die Geschossfläche A_G^i wird aus Konsistenzgründen über das Projektvolumen bestimmt und nicht direkt dem Parameter F_G^i der Baueingabedaten entnommen. Zur Flächenbestimmung wird eine Stockwerkshöhe von $h_{STW} = 3m$ (Meter) angenommen. Um die Geschossfläche in Quadratmeter zu berechnen, wird das Gebäudevolumen durch die Stockwerkshöhe dividiert: $A_G^i = V_G^i / h_{STW}$. Diese Fläche verteilt sich zu gleichen Anteilen auf alle Geschosse unter und über Terrain. Die Fläche eines Stockwerks in Gebäude i , A_S^i , ist somit $A_S^i = A_G^i / (F_+^i + F_-^i)$.

Zur Bestimmung der Fläche der Tiefgarage eines Projekts i , A_{TG}^i , wird das Tiefgaragenvolumen unter der Annahme eines Stockwerks unter Terrain durch die Stockwerkshöhe dividiert, somit

$$A_{TG}^i = V_{TG}^i / h_{STW}$$

Hierbei wird die Tiefgarage sowohl für EFH als auch für MFH-Projekte als einzelne Einheit betrachtet, vor allem für EFH-Siedlungen wird somit nur eine Entität betrachtet.

10.2.1.6 Gebäudegrundrissform

Die Grundrissfläche eines Gebäudes in einem Projekt wird durch die Stockwerksfläche, A_S^i , beschrieben. Zur Anwendung der Bauteilflächen gemäss SIA 2032:2020 müssen jedoch zusätzlich die Seitenlängen des Gebäudes zur Berechnung des Umfangs bekannt sein. Da der Umfang einer quadratischen Form des Grundrisses minimal ist, beruht das Modell auf der Annahme einer rechteckigen Form, wobei die Seitenasymmetrie in Abhängigkeit der Gebäudegrösse gewählt wird. Für Gebäude mit Geschossfläche über Terrain, $A_{G+}^i = A_S^i \cdot F_+^i$, bis

3000 m² wird das Seitenverhältnis 2:1, im Bereich von 3000 bis 6000 m² das Seitenverhältnis 3:1 und für Werte ab 6000 m² das Seitenverhältnis 4:1 angenommen. Der Asymmetriefaktor ρ^i beschreibt diesen Zusammenhang und ist definiert durch

$$\rho^i = 2 + I_{A_{G+}^i \geq 3000} + I_{A_{G+}^i \geq 6000}$$

Somit berechnen sich die kurze und lange Seite, b_G^i und a_G^i , eines Gebäudes durch

$$b_G^i = \sqrt{\frac{A_S^i}{\rho^i}}, \quad a_G^i = \rho^i \cdot b_G^i$$

Der Asymmetriefaktor ρ^i wird in gleicher Form für die Berechnung der kurzen und langen Seite, b_{TG}^i und a_{TG}^i , der Tiefgarage des Bauprojekts angewendet. Somit berechnen sich die Seitenlängen durch

$$b_{TG}^i = \sqrt{\frac{A_{TG}^i}{\rho^i}}, \quad a_{TG}^i = \rho^i \cdot b_{TG}^i$$

10.3 Dimensionierung der Bauelemente nach SIA 2032:2020

Bauelemente werden gemäss Tabelle 1 in Elementgruppen eingeteilt. In diesem Anhang wird der Hauptteil mit Details zur Dimensionierung einzelner Elemente ergänzt.

10.3.1 Vorarbeiten

Das Aushubvolumen des Projekts i , $V_{Aushub,G}^i$, wird gemäss Vorprojektdimensionierung der Norm SIA 2032:2020 angerechnet. Hierfür wie Stockwerksfläche, A_S , mit der notwendigen Aushubtiefe multipliziert, welche sich als Produkt aus der Anzahl der der Stockwerke unter Terrain, F_- , mit der entsprechenden Stockwerkshöhe, h_{STW} , und einem zusätzlichen Aushub von 1m Tiefe gemäss Norm 2032:2020 ergibt. Letzter soll den Aushub auf den Seiten des Gebäudes schätzen. Somit ergibt sich unter Berücksichtigung der Multiplizität des Projekts, n^i , das Aushubvolumen des Bauprojekts in m³ durch

$$V_{Aushub,G}^i = n^i \cdot A_S^i \cdot (F_-^i \cdot h_{STW} + 1)$$

Die Tiefgarage wird als separate und einzelne Einheit im Projekt berechnet. Für das Aushubvolumen der Tiefgarage ergibt sich unter der Annahme eines Stockwerks:

$$V_{Aushub,TG}^i = A_G^i \cdot (h_{STW} + 1)$$

Das gesamte Aushubvolumen des Projekts, V_{Aushub}^i , ergibt sich aus der Summe der Beiträge aus Wohngebäude und Tiefgarage,

$$V_{Aushub}^i = V_{Aushub,G}^i + V_{Aushub,TG}^i$$

Die Baugrubensicherung des Projekts umfasst Elemente seitlich der Gebäudeausenwände unter Terrain. Gemäss Norm SIA 2032:2020 müssen hierfür die Bauteilflächen berechnet werden. Der Umfang des Gebäudes wird durch die vier Seiten bestimmt, deren Längen jeweils um $z_{BG} = 0.25m$ pro Seite erweitert werden, um dem zusätzlichen Abstand von der Aussenwand Rechnung zu tragen. Für die Längen der langen Seite, a_G^i , und der kurzen Seite, b_G^i , ergibt sich damit für die Bauteilfläche des Baugrubenabschlusses unter Berücksichtigung der Multiplizität des Projekts als

$$B_{BG,G}^i = n^i \cdot 2 \cdot (a_G^i + b_G^i + 2 \cdot z_{BG}) \cdot h_{STW} \cdot F^i$$

Die Bauteilflächen der Baugrubensicherung der Tiefgaragen, $B_{BG,TG}^i$, berechnen sich durch die Längen der langen Seite, a_{TG}^i , und der kurzen Seite, b_{TG}^i , der Tiefgarage und der Stockwerkshöhe unter der Annahme eines Stockwerks zu

$$B_{BG,TG}^i = I_{TG}^i \cdot 2 \cdot (a_{TG}^i + b_{TG}^i + 2 \cdot z_{BG}) \cdot h_{STW}$$

Die gesamte Bauteilfläche der Baugrubensicherung ergibt sich aus der Summe der Beiträge des Gebäudes und der Tiefgarage:

$$B_{BG}^i = B_{BG,G}^i + B_{BG,TG}^i$$

Da die Baueingabedaten keine Informationen über die Ausführung einer Baugrubensicherung enthalten, jedoch nicht alle Gebäude über eine solche verfügen, werden Anteil der Baugrubensicherung mit dem Faktor 0.5 gewichtet.

Die Baueingabedaten enthalten keine Informationen über die Ausführung einer Pfählung eines Gebäudes. Hier wird die Annahme getroffen, dass die Hälfte aller Gebäude mit 5 bis 9 Stockwerken gepfählt, Gebäude mit 10 Stockwerken oder mehr immer gepfählt sind. Tiefgaragen werden per Annahme nicht gepfählt. Die Bauteilfläche der Pfählung des Projekts, B_p^i , berechnet sich gemäss Norm SIA 2032:2020 durch 1.5m Pfahllänge pro m^2 Fundamentfläche, wobei letztere im vorliegenden Modell durch die Stockwerksfläche, A_S^i , geschätzt wird. Damit wird die Bauteilfläche der Pfählung berechnet durch

$$B_p^i = n^i \cdot 1.5 \cdot A_S^i \left(0.5 \cdot I_{F_{\pm}^i \geq 5} + 0.5 \cdot I_{F_{\pm}^i \geq 10} \right)$$

10.3.2 Gebäudehülle unter Terrain

Die Gebäudehülle unter Terrain umfasst Fundament, Bodenplatte, Aussenwand und Dach unter Terrain.

Im Modell werden Fundament und Bodenplatte gleichgesetzt und durch die Dimensionierung der Stockwerksfläche eines Gebäudes i , A_S^i , und der Multiplizität des Projekts geschätzt. Die Bauteilfläche des Fundaments des Projekts i , $B_{F,G}^i$, ergibt sich somit zu

$$B_{F,G}^i = n^i \cdot A_S^i$$

Das Fundament der Tiefgarage, $B_{F,TG}^i$, wird durch die Fläche der Tiefgarage A_{TG}^i geschätzt, somit $B_{F,TG}^i = A_{TG}^i$. Die gesamte Bauteilfläche des Bauprojekts, B_F^i , ist die Summe der Fundamente des Gebäudes und der Tiefgarage,

$$B_F^i = B_{F,G}^i + B_{F,TG}^i$$

Die Aussenwandflächen der Gebäude eines Projekts i unter Terrain werden aus den Seitenlängen des Gebäudes, der Stockwerkshöhe und der Geschosszahl unter Terrain berechnet. Zudem wird die Multiplizität des Gebäudes berücksichtigt. Die Bauteilfläche aller Aussenwände der Gebäude des Projekts, B_{AW-}^i , ergibt sich durch

$$B_{AW-,G}^i = n^i \cdot 2 \cdot (a_G^i + b_G^i) \cdot h_{STW}$$

Die Bauteilfläche der Aussenwände der Tiefgarage eines Projekts i , $B_{AW,TG}^i$, wird berechnet durch

$$B_{AW,TG}^i = 2 \cdot (a_{TG}^i + b_{TG}^i) \cdot h_{STW}$$

Die gesamte Bauteilfläche der Aussenwände unter Terrain ergeben sich durch die Summe der Aussenwände des Gebäudes und der Tiefgarage,

$$B_{AW-}^i = B_{AW-,G}^i + B_{AW,TG}^i$$

Gemäss Gebäudemodell überdeckt das Gebäude über Terrain exakt die Gebäudeteile unter Terrain, wodurch keine Beiträge aus unter Terrain Dächern aus dem Gebäude entstehen. Tiefgaragen hingegen werden als separate Einheiten betrachtet, die nicht von Gebäuden überdeckt werden. Somit wird die volle Dachfläche der Tiefgaragen angerechnet. Für Projekt i ist somit die Dachfläche unter Terrain, B_{D-}^i , gegeben durch

$$B_{D-}^i = A_{TG}^i$$

10.3.3 Gebäudehülle über Terrain

Die gesamte Bauteilfläche der Aussenwände über Terrain eines Projekts i , B_{AW+}^i , werden über die Längen der kurzen Seite, a_G^i , und der langen Seite, b_G^i , der Stockwerkshöhe, h_{STW} , der Geschossanzahl über Terrain, F_+^i , und der Gebäudemultiplizität im Projekt, n^i , berechnet. Davon abgezogen werden Fensterflächen unter Annahme des Fensteranteils, r_F , von 35%. Insgesamt ergibt sich die Bauteilfläche der Aussenwände über Terrain im Projekt durch

$$B_{AW+}^i = n^i \cdot 2 \cdot (a_G^i + b_G^i) \cdot F_+^i \cdot h_{STW} \cdot (1 - r_F)$$

Die Bauteilfläche B_{AW+}^i wird sowohl für die Konstruktion als auch für die Fassade als Grundlage genommen.

Fensterflächen bilden den restlichen Anteil der seitlichen Aussenflächen des Projekts über Terrain. Türen werden nicht berücksichtigt. Somit beträgt die Bauteilfläche für Fenster eines Projekts i ,

$$\begin{aligned} B_W^i &= n^i \cdot 2 \cdot (a_G^i + b_G^i) \cdot F_+^i \cdot h_{STW} \cdot r_F \\ &= B_{AW+}^i \cdot \frac{r_F}{1 - r_F} \end{aligned}$$

Die Bauteilfläche des Dachs wird anhand des Indikators, I_D^i , für Flach- und Schrägdächer berechnet. Das Modell beruht auf der Annahme eines Satteldachs mit einem Winkel von $\gamma_D = 35^\circ$. Dies entspricht einer Steigung⁸ von $s_D = \tan\left(\gamma_D \cdot \frac{\pi}{180}\right) \approx 0.7$. Es wird weiters zwischen Flächen für die Dachhaut und die Dachkonstruktion unterschieden. Per Modellannahme ist die Dachkonstruktion immer eine horizontale Fläche identisch der Stockwerksfläche. Die Bauteilfläche der Dachhaut jedoch unterscheidet zwischen Flach- und Schrägdach aufgrund der durch die Dachsteigung erhöhte Fläche in Schrägdächern.

Die für Projekt i aggregierte Bauteilfläche der Dachkonstruktion, ist unabhängig von der Dachform und gegeben über die Stockwerksfläche, A_S^i , und die Gebäudemultiplizität, n^i , durch

$$B_{DK}^i = n^i \cdot A_S^i$$

Die für Projekt i aggregierte Bauteilfläche der Dachhaut, B_{DH}^i , wird als die Summe über Flach- und Schrägdachanteil im Projekt berechnet, wobei für jedes Projekt lediglich eine Dachform angenommen wird:

$$B_{DH}^i = n^i \cdot (I_{DF}^i \cdot B_{DHF}^i + I_{DS}^i \cdot B_{DHS}^i)$$

Die Indikatoren I_{DF}^i und I_{DS}^i zeigen an, ob die Gebäude im Projekt Flachdächer oder Schrägdächer haben. Die Bauteilfläche eines Flachdachs, B_{DHF}^i , ist gegeben durch die Stockwerksfläche, $B_{DHF}^i = A_S^i$. Die Bauteilfläche eines Schrägdachs, B_{DHS}^i , wird über die Dachsteigung, s_D , die Längen der langen Seite, a_G^i , und der kurzen Seite, b_G^i , berechnet. Zusätzlich wird bei der Dachhaut von Schrägdächern eine Auskragung von $d = 0.5 \text{ m}$ auf jede Seite angenommen, sodass die Seitenlängen der Dächer für die lange Seite durch $\hat{a}_G^i = a_G^i + 2d$ und für die kurze Seite als $\hat{b}_G^i = b_G^i + 2d$ gegeben sind. Mit der Dachsteigung, s_D , und der Annahme, dass das Dach zentral zu einem Spitz zusammenläuft, ergibt sich die Bauteilfläche der Dachhaut eines Schrägdachs durch

$$B_{DHS}^i = \hat{a}_G^i \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \hat{b}_G^i\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \hat{b}_G^i \cdot s_D\right)^2} + \hat{b}_G^i \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \hat{a}_G^i\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \hat{b}_G^i \cdot s_D\right)^2}$$

10.3.4 Innen- und Aussenbauteile

⁸ Das Gebäudemodell rechnet mit ungerundeten Werten für die Dachsteigung.

Gemäss der Dimensionierungsvorgabe der Vorprojektphase der Norm SIA 2032:2020 werden Innenwände als 80% der Geschossfläche aller Geschosse (unter und über Terrain) angenommen und zu gleichen Teilen auf tragende und nicht-tragende Komponenten aufgeteilt. Somit ergibt sich für die Bauteilfläche von tragenden Innenwänden, B_{IWT}^i , und nicht-tragenden Innenwänden, B_{IWN}^i , die identische Abhängigkeit von Gebäudemodellparametern:

$$\begin{aligned} B_{IWT}^i &= n^i \cdot 0.4 \cdot (F_+^i + F_-^i), \\ B_{IWN}^i &= n^i \cdot 0.4 \cdot (F_+^i + F_-^i) \end{aligned}$$

Die Bauteilflächen der Geschossdecken werden durch die Summe der Flächen aller Geschosse über und unter Terrain eines Gebäudes abzüglich des obersten Stockwerks⁹ und unter Berücksichtigung der Gebäudemultiplizität im Bauprojekt berechnet. Somit ist die auf Projekt i aggregierte Bauteilfläche der Geschossdecken, B_{GD}^i , gegeben durch

$$B_{GD}^i = n^i \cdot A_S^i \cdot (F_+^i + F_-^i - 1)$$

Die aggregierte Bauteilfläche der Böden, B_B^i , in einem Projekt i wird durch die Stockwerksfläche, A_S^i , und die Anzahl der Stockwerke über Terrain, F_+^i , berechnet. Hier geht die Annahme ein, dass Stockwerke unter Terrain keine verarbeiteten Böden aufweisen, sondern durch die Tragekonstruktion gegeben sind. Insgesamt beläuft sich die Bauteilfläche für alle Böden eines Bauprojekts auf

$$B_B^i = n^i \cdot A_S^i \cdot F_+^i$$

Die Bauteilflächen der Balkone, B_V^i , für ein Bauprojekt i werden durch die Modellannahme von $A_V = 7 \text{ m}^2$ pro Wohneinheit angerechnet. Somit ergibt sich für die Gesamtbauteilfläche

$$B_V^i = W_p^i \cdot A_V$$

10.3.5 Gebäudetechnik

Die Elementgruppe zu Gebäudetechnik umfasst elektro-, wärme-, luft- und wassertechnische Anlagen. Mit Ausnahme photovoltaischer Anlagen werden KBOB-Ökobilanzdaten über die Bezugsgrösse der Energiebezugsfläche (EBF) angewendet. Die EBF eines Projekts i , EBF^i , wird über die Stockwerke über Terrain, F_+^i , die Stockwerksfläche, A_S^i , und die Gebäudemultiplizität im Projekt, n^i , geschätzt:

$$EBF^i = n^i \cdot A_S^i \cdot F_+^i$$

Photovoltaische Anlagen werden über die Bezugsgrösse der Bauteilfläche der Solarkollektoren, B_{PV}^i , aggregiert auf Projekt i , berechnet. Per Annahme werden im Modell $r_{PV,S} = 40\%$ der

⁹ Beiträge des obersten Stockwerks zur Grauen Energie werden über die Dachkonstruktion berücksichtigt, sowohl für Gebäude als auch für Tiefgaragen.

Dachhaut eines Schrägdachs respektive $r_{PV,F} = 80\%$ der Dachhaut eines Flachdachs als Bauteilfläche der Solarkollektoren berücksichtigt. Somit ergibt sich die Bauteilfläche zu

$$B_{PV}^i = B_{DH}^i \cdot (I_{DS}^i \cdot r_{PV,S} + I_{DF}^i \cdot r_{PV,F})$$

10.4 Anwendung KBOB-Ökobilanzdaten

Die Norm SIA 2032:2020 basiert auf Anwendung von aggregierten KBOB-Ökobilanzdaten. Die relevanten Materialien nach Bauteilgruppen gemäss Norm sind in Tabelle 13 dargestellt. Ersatzwerte für bestimmte Bauelemente werden aus für die Schweiz typische Materialien konstruiert, wobei die verschiedenen Materialien zu gleichen Teilen im Ersatzwert gewichtet werden. Die Materialien, die für ein Bauelement in die Ersatzwertberechnung eingehen sind durch den Indikator I_{FB} in Anhang 10.1.1 angezeigt. Die Ersatzwertmethodologie und Materialisierung wurde durch das Departement Technik und Architektur der Hochschule Luzern erstellt und den Entwicklern des Scope 3 PACTA-Moduls zur Verfügung gestellt, in welchem diese Methodologie übernommen wurde.

Gebäudeteil	Element	Bezeichnung	Ersatzwert-Rechnung	Indikator Baueingaben	Bezugsgrösse	Einheit	Primärenergie (nicht-erneuerbar) [kWh / Jahr]	Graue Treibhausgasemissionen [kg/Jahr]
Vorarbeiten	Aushub	Aushub maschinell	I_{FB}	-	Volumen	m3	0.027333333	0.007216667
	Baugrubenabschluss	Baugrubensicherung, Rühlwand, gespriesst [m2]	I_{FB}	-	BTF	m2	10.61333333	3.104333333
	Baugrubenabschluss	Baugrubensicherung, Schlitzwand, 400 mm [m2]	I_{FB}	-	BTF	m2	19.4	7.055
	Baugrubenabschluss	Baugrubensicherung, Spundwand, auskragend [m2]	I_{FB}	-	BTF	m2	12.186	2.817666667
	Pfählung	Mikrobohrpfahl (Annahme 1.5 m Pfählung pro m2 Bodenplatte)	I_{FB}	-	Bodenplatte	m2	2.75	0.785
	Pfählung	Ortbetonverdrängungspfahl (Annahme 1.5 m Pfählung pro m2 Bodenplatte)	I_{FB}	-	Bodenplatte	m2	6.4	2.3975
	Pfählung	Vorgefertigter Betonpfahl (Annahme 1.5 m Pfählung pro m2 Bodenplatte)	I_{FB}	-	Bodenplatte	m2	1.4625	0.73
Gebäudehülle unter Terrain	Fundament, ungedämmt	Beton 30 cm und Sauberkeitsschicht	I_{FB}	-	BTF	m2	4.105720552	1.7191212
	Fundament, gedämmt	Beton 30 cm und Sauberkeitsschicht, Dämmung Mittelwert XPS/Schaumglas	I_{FB}	I_D^i	BTF	m2	6.959703469	2.793926408
	Aussenwand, ungedämmt	Betonwand 25 cm, Bitumenanstrich & Noppenfolie	I_{FB}	-	BTF	m2	4.247119929	1.51842673
	Aussenwand, gedämmt	Betonwand 25 cm, Dämmung Mittelwert XPS/Schaumglas, Befestigung und Noppenfolie	I_{FB}	I_D^i	BTF	m2	7.848892846	2.647881938
	Dach, ungedämmt	Betondecke 30 cm, 1 x Polymerbitumendichtungsbahn, Schutzmatte, Kies	I_{FB}	-	BTF	m2	5.363268556	2.001193357
	Dach, gedämmt	Betondecke 30 cm, Dämmung Mittelwert XPS/Schaumglas, 2 x Polymerbitumendichtungsbahn, Schutzmatte, Kies	I_{FB}	I_D^i	BTF	m2	10.86406314	3.518106898
Gebäudehülle über Terrain	Aussenwandkonstruktion, Beton	Betonwand 20 cm, Putzsystem und Anstrich	I_{FB}	$I_{Betonwand}^i$	BTF	m2	3.255721977	1.258114084
	Aussenwandkonstruktion, Backstein	Backsteinwand 17.5 cm, Putzsystem und Anstrich	I_{FB}	$I_{Backsteinwand}^i$	BTF	m2	3.174911	1.0897225
	Aussenwandkonstruktion, Holz	Brettstapelwand 10 cm, Gipsbekleidung inkl. Spachtel, Anstrich und Unterkonstruktion	-	$I_{Holzwand}^i$	BTF	m2	1.1792229	0.27262895

	Aussenwandkonstruktion, Einsteinmauerwerk	Einsteinmauerwerk/Porotherm 49 cm, Putzsystem und Anstrich	-	$I_{Einsteinmauer}^i$	BTF	m2	6.9323188	2.03260415
	Aussenwandkonstruktion, Stützenraster	Betonstützen für 3 Geschosse, Mittelwert Ortbetonstütze und Stütze vorfabriziert pro m2 Fassadenfläche (alle 3 m eine Betonstütze)	-	$I_{Stützenraster}^i$	AW ü.T.	m2	0.511661344	0.152676089
	Aussenwandbekleidung, Äussere Beschichtung, Putz	Mineralisches Aussenputzsystem (Grundputz, Deckputz) inkl. Farbanstrich	I_{FB}	-	BTF	m2	0.531846	0.178505083
	Aussenwandbekleidung, verputzte Aussenwärmendämmung	Aussenwärmendämmung Steinwolle/EPS, mineralischer Verputz, inkl. Befestigung und Farbanstrich	I_{FB}	I_D^i	BTF	m2	4.400654667	1.150460417
	Aussenwandbekleidung, Bekleidung Holz, hinterlüftet	Bekleidung Massivholz (Holzschalung Fichte/Lärche lasiert) inkl. Unterkonstruktion (Mittelwert Konsole/Dübel), Dämmung Mineralwolle	I_{FB}	$I_{Holzwand}^i$	BTF	m2	2.093446987	0.47219822
	Aussenwandbekleidung, Faserzement / Naturstein, hinterlüftet	Mittelwert Faserzement / Naturstein grossformatig inkl. Unterkonstruktion und Mineralwollendämmung	I_{FB}	$I_{Faserzementfa}^i$	BTF	m2	4.344833144	1.044617778
	Aussenwandbekleidung, Metall / Glas, hinterlüftet	Mittelwert Alu-Verbundplatte / Einscheibensicherheitsglas, Leichtmetall Unterkonstruktion, Mineralwollendämmung	-	$I_{Metallfassade}^i$, $I_{Glasfassade}^i$	BTF	m2	7.717754989	1.799143164
	Fenster, Mittelwert 3-fach IV, inkl. Sonnenschutz	Holz-Metallfenster über Brüstung, Rahmenanteil 22 %, Lamellenstoren (Aluminiumlamellen inkl. Storenkasten, Antrieb, Führungsschienen)	I_{FB}	-	BTF	m2	17.11081333	4.243673333
	Dachkonstruktion	Betondecke 25 cm, Putzsystem und Anstrich	I_{FB}	-	BTF	m2	3.759268537	1.490048404
	Dachkonstruktion	Brettstapeldecke 5-6 m Spannweite, 23 cm Massivholz verdübelt, Gipsbekleidung inkl. Spachtel, Anstrich und Unterkonstruktion	-	$I_{Holzdach}^i$	BTF	m2	2.494482567	0.549926783
	Dachhaut, Flachdach gedämmt	Dachaufbau, Mittelwert EPS/PUR/Steinwolle. Bituminöse Dampfbremse, 2 x Polymerbitumendichtungsbahn, Schutz-/Trennschicht, Extensivbegrünung	I_{FB}	I_D^i	BTF	m2	11.46185533	2.996293444
	Dachhaut, geneigtes Dach gedämmt	Mineralwollendämmung, Ziegeleindeckung inkl. Unterdach und Verankerung (Standardeindeckung, Konter- und Ziegellattung, diffusionsoffene Unterdachfolie)	I_{FB}	I_D^i	BTF	m2	3.701859562	1.031688737
Innen- und Aussenbauteile	Innenwand, tragend	Mittelwert Beton 20 cm, Backstein/KS 15 cm	I_{FB}	-	BTF	m2	3.460425759	1.242277478
	Innenwand, nicht-tragend	Mittelwert nicht-tragend	I_{FB}	-	BTF	m2	4.872876989	1.145989141
	Geschossdecke	Betondecke 25 cm	I_{FB}	-	BTF	m2	3.759268537	1.490048404
	Geschossdecke	Hohlkörperdecke (6 m Spannweite), mit Schalldämmung, Massivholz verleimt	-	$I_{Holzdecke}^i$	BTF	m2	1.50113882	0.327751817
	Boden, Unterkonstruktion und Bodenbelag	Mittelwert Mehrschichtparkett/Keramikplatten, Zementunterlagsboden, Trennschicht, 2 cm Trittschall	I_{FB}	$I_{Unterlagsboden}^i$	BTF	m2	4.179735667	1.24019
	Boden, Dämmung gegen unbeheizt	Glaswolle 12 cm und Vlies	-	I_D^i	BTF	m2	1.222145	0.24799
	Balkon inkl. Absturzsicherung	Balkon	I_{FB}	I_B^i	BTF	m2	11.66299466	3.935916047
Gebäudetechnik	Elektroanlage	Elektroanlage Wohnen	I_{FB}	-	EBF	m2	1.797266667	0.431666667
	Solarstromanlage	Solarstromanlage Flachdach	I_{FB}	-	Leistung	kWp	18.94666667	5.32
	Wärmeerzeuger	Wärmeerzeuger 30 W/m2	I_{FB}	-	EBF	m2	0.47504	0.12894
	Wärmeverteilung	Verteilung Wohnen, Fussbodenheizung	I_{FB}	-	EBF	m2	1.170866667	0.284166667

	Erdwärmanlage	Durchschnittliche Sondenlänge pro m2 EBF-Wohnen und Büro	I_{FB}	-	EBF	m2	2.078625	0.526875
	Solarkollektoren	Flachkollektor für Warmwasser MFH	I_{FB}	-	BTF	m2	22.23333333	5.6
	Lüftungsanlage	Abluftanlage Küche und Bad	I_{FB}	-	EBF	m2	0.456931	0.1215
	Lüftungsanlage	Lüftungsanlage, spez. Luftmenge 1 m3/hm2 EBF	I_{FB}	-	EBF	m2	1.681466667	0.497933333
	Wasseranlage	Sanitäranlagen, Wohnen, inkl. Apparate und Leitungen	I_{FB}	-	EBF	m2	1.5361	0.418

Tabelle 13: KBOB-Ökobilanzdaten und Baueingabeindikatoren zu Materialisierung von einzelnen Bauelementen. Datenquelle: (KBOB, 2023).

10.5 Sensitivitätsanalyse Stockwerksfläche

Den grössten Einfluss auf die Werte von nicht-erneuerbarer Primärenergie und grauen Treibhausgasemissionen in Erstellung, Transport und Entsorgung hat das Volumen der verbauten Materialien. Dieser Effekt wird durch eine Skalierungsanalyse verdeutlicht, in der als Beispielgebäude ein EFH ohne Tiefgarage, Balkone, Solar- und Erdwärmeanlagen betrachtet wird. Die Stockwerksfläche, A_S^i , wird für die Skalierung zwischen den Werte 100 m² bis 700 m² variiert (*ceteris paribus*), um den Einfluss der Grösse eines Gebäudes auf dessen Menge an grauen Treibhausgasemissionen¹⁰ zu untersuchen. Bei dem Beispielgebäude handelt es sich um ein Gebäude mit 2 Stockwerken über Terrain, 1 Stockwerk unter Terrain mit Flachdach.

Abbildung 17 zeigt die Skalierungsanalyse für die Gesamtmenge an grauen Treibhausgasemissionen, welche dem Gebäude pro Jahr zugerechnet werden. Die Analyse zeigt diese Menge für das Gebäude im Total (pink) und für die einzelnen Bauelemente¹¹ (blau). Es wird ersichtlich, dass die Menge an grauen Treibhausgasemissionen sehr stark von der Stockwerksfläche und damit der Gebäudekubatur abhängt. Allgemein skalieren Gebäudeelemente, deren Dimensionierung über die Stockwerksfläche berechnet wird, linear mit der Stockwerksfläche. Bauelemente, die vom Gebäudeumfang abhängen, skalieren im Modell mit gemäss dem Skalierungsverhalten des Gebäudeumfangs. Unter einer Zunahme der Fläche A_S^i um $\tilde{A}_S^i = \alpha_A \cdot A_S^i$ skaliert der Umfang U_S^i gemäss $\tilde{U}_S^i = U_S^i \cdot \sqrt{\alpha_A}$. Das Skalierungsverhalten entspricht somit einer Wurzelfunktion in der Änderung der Stockwerksfläche. Somit steigen graue Treibhausgasemissionen unterproportional zur Änderung in der Stockwerksfläche. Auf das Gebäudetotal bedeutet dies, dass die Menge an grauen Treibhausgasemissionen leicht unterproportional zur Flächenzunahme steigt.

¹⁰ Die Skalierungsergebnisse hinsichtlich nicht-erneuerbarer Primärenergie sind qualitativ identisch zu jenen für graue Treibhausgasemissionen.

¹¹ Bauelemente, welche keinen Beitrag für das Beispielgebäude liefern, wie etwa Garagenanteile, werden nicht gezeigt.

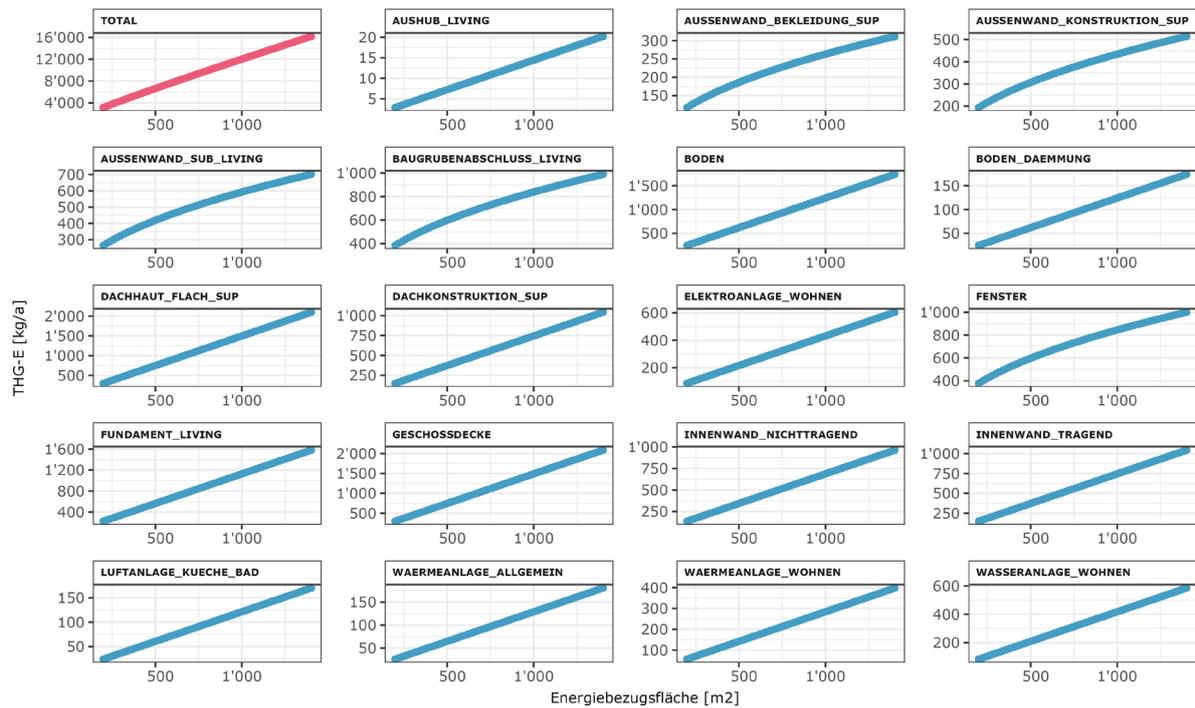


Abbildung 17: Skalierungsverhalten der grauen Treibhausgasemissionen pro Jahr in Abhängigkeit von Stockwerksfläche für ein Beispielgebäude, im Total und nach Bauelement. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Die Effizienzgewinne grösserer Gebäude bezüglich der gTHG-E werden vor allem in einer Betrachtung der Emissionen relativ zur Energiebezugsfläche ersichtlich. Abbildung 17 stellt das Skalierungsverhalten des Beispielgebäudes hinsichtlich Flächenzunahme durch die Metrik graue Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr dar, im Total und für einzelne Gebäudeelemente.

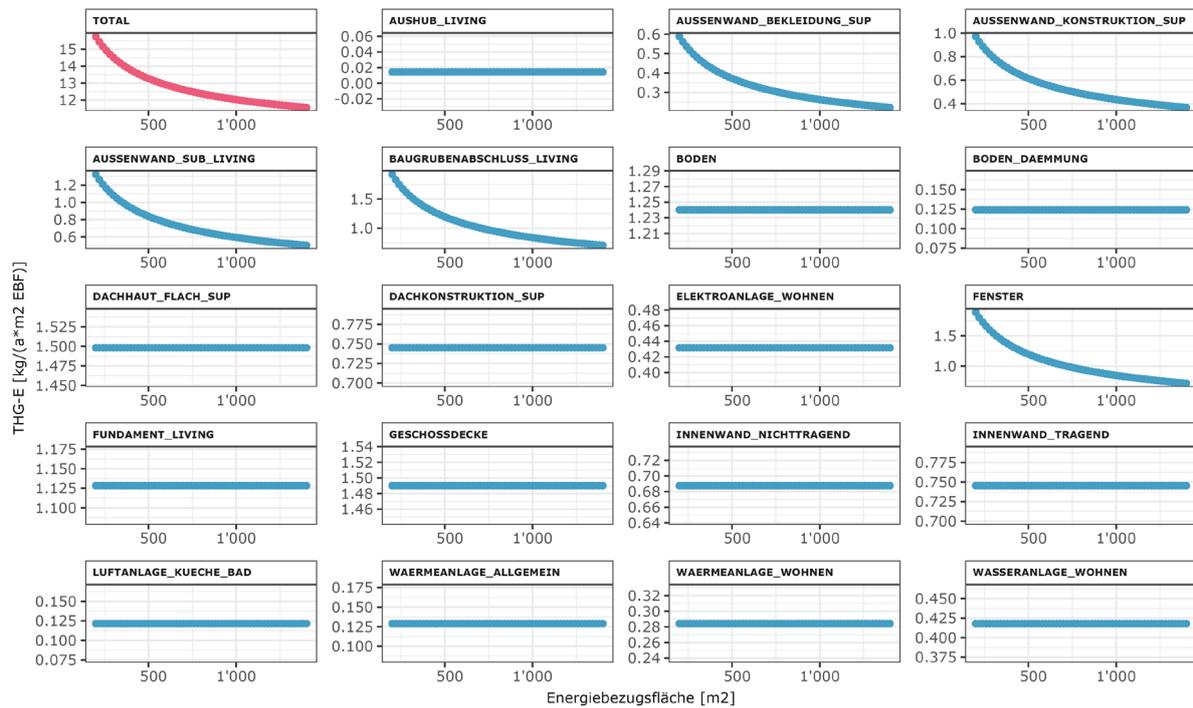


Abbildung 18: Skalierungsverhalten der grauen Treibhausgasemissionen pro Jahr und Energiebezugsfläche in Abhängigkeit von Stockwerksfläche für ein Beispielgebäude, im Total und nach Bauelement. Datenquelle: Baublatt/Bauinfo-Center Docu Media, 2023.

Abbildung 18 lässt sich entnehmen, dass Bauelemente, deren graue Treibhausgasemissionen linear mit der Stockwerksfläche skalieren, in der relativen Grösse der Emissionen pro Quadratmeter Energiebezugsfläche konstant bleiben, da das lineare Verhalten in der Fläche durch die Division durch den Flächenanteil konstant wird. Für Bauelemente hingegen, deren Skalierungsverhalten für graue Treibhausgasemissionen im Total mit dem Gebäudeumfang und somit unterproportional zur Flächenzunahme wächst, gilt unter $\tilde{A}_S^i = \alpha_A \cdot A_S^i$ eine Skalierung der Beiträge mit $\frac{\tilde{U}_S^i}{\tilde{A}_S^i} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_A}} \cdot \frac{U_S^i}{A_S^i}$. Relativ zur Energiebezugsfläche gemessen führt eine Verdoppelung der Stockwerksfläche ceteris paribus somit zu einer Reduktion von ungefähr 29.3% in jenen Beiträgen, die über den Gebäudeumfang dimensioniert werden.