

Integration dynamischer CO₂-Emissionsfaktoren in die ökobilanzielle Untersuchung von betriebsbedingten und materialgebundenen Emissionen im Bauwesen

Vergleich zweier Sanierungsvarianten anhand einer Liegenschaft des Deutschen Alpenvereins

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
M.Sc. Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen
an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Betreut von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang und Kathrin Theilig (M.Sc.)
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von Stephanie Katharina Schwarz
Forststraße 40
82069 Hohenschäftlarn
Tel: +49 1577 3873550

Eingereicht am München, den 07.06.2023

Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,
Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Frau Stephanie Katharina Schwarz
Forststraße 40
82069 Hohenschäftlarn

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Masterarbeit
mit dem Titel

Integration dynamischer CO₂-Emissionsfaktoren in die ökobilanzielle Untersuchung
von betriebsbedingten und materialgebundenen Emissionen im Bauwesen

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen der Verfasserin / des Verfassers, dem Titel der Arbeit, den Betreuer:innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studierenden und Besucher:innen zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.
Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

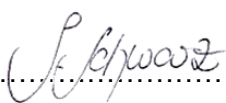
Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den

München, den 07.06.2023

.....


.....

(TUM)

(Autor:in)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, den 07.06.2023

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'J. Schwarz', written in black ink.

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	1
Kurzfassung.....	3
Abstract	5
Abkürzungsverzeichnis	7
Glossar	9
1. Einleitung.....	13
2. Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit.....	15
3. Vorgehensweise und Methodik.....	17
4. Stand der Technik und der Forschung im Bereich der DLCA.....	21
5. Statische LCA – Vergleich der Sanierungsvarianten.....	27
5.1. Ziel und Untersuchungsrahmen in der statischen LCA	27
5.1.1. Vorstellung des Untersuchungsgebäudes.....	27
5.1.2. Variante <i>Klimaneutralität im Betrieb</i>	31
5.1.3. Variante <i>Klimafreundliche Konstruktion</i>	32
5.1.4. Rahmenparameter der Ökobilanzstudie	33
5.2. Sachbilanz aller Varianten	36
5.2.1. Flächenberechnung der Gebäudehülle und innenliegenden Bauteile ...	37
5.2.2. Solarertragsberechnung	39
5.2.3. DIN 18599 Berechnung zur Bilanzierung des Betriebsenergiebedarfs..	40
5.2.4. Festlegung der Bauteilaufbauten für alle Varianten - Bauteilkatalog	42
5.2.5. Massenermittlung zur Bilanzierung der grauen Energie.....	60
5.3. Wirkungsabschätzung der statischen LCA.....	61
5.4. Interpretation der SLCA-Ergebnisse	65
6. Implementierung dynamischer CO ₂ -Emissionsfaktoren in die vorstehende LCA.	67
6.1. Untersuchungsrahmen in der DLCA	67
6.1.1. Grenzen der dynamischen Betrachtung.....	68
6.1.2. Künftige Entwicklung der Energieversorgung	70
6.1.3. Einfluss von Strom und Wärme auf die grauen Emissionen.....	71
6.2. Wirkungsabschätzung der dynamischen LCA und Vergleich zur SLCA	72

6.3.	Sensitivitätsanalyse der DLCA-Ergebnisse und -Methodik.....	74
6.3.1.	Sensitivität auf verwendete Datenbasis.....	74
6.3.2.	Sensitivität auf methodisches Vorgehen	76
6.4.	Interpretation der DLCA-Ergebnisse	77
7.	Einordnung der Ergebnisse in den Kontext der internationalen Klimaziele von Paris	79
8.	Fazit.....	81
9.	Ausblick	85
	Literaturverzeichnis.....	87
	Abbildungsverzeichnis	95
	Tabellenverzeichnis	97
	Anhang 1: Rechenbeispiel zur Implementierung der dynamischen Energieversorgung	99
	Anhang 2: Zusatzinformationen zur Flächenberechnung	101
	Anhang 3: Solarertragsberechnung mit Polysun	103
	Anhang 4: 18599-Berechnung in SolarComputer	107
	Anhang 5: Verwendete Datensätze aus Ökobaudat und Ecoinvent.....	111
	Anhang 6: U-Wert-Berechnungen in Ubakus	125
	Anhang 7: Zusätzliche Diagramme zu SLCA und DLCA	129
	Anhang 8: Auszüge aus den referenzierten Ecoinvent-Datensätzen.....	133
	Anhang 9: Zusatzinformationen zur Sensitivitätsanalyse.....	135
	Anhang 10: Zusatzinformationen zum CO ₂ -Budget.....	137
	Anhang 11: Plansatz zum Bestandsgebäude und der Sanierungsmaßnahme	139

Kurzfassung

Im Hinblick auf die voranschreitende globale Erwärmung und das 1,5 °C-Ziel des Pariser Abkommens ist die Relevanz der Ökobilanzierung für künftige Baumaßnahmen zur Untersuchung ihrer Klimawirkung unbestreitbar. Hier stellt sich die Frage, inwieweit die aktuelle Methodik der Lebenszyklusanalyse (LCA) künftige Entwicklungen überhaupt abbilden kann, da bisher lediglich statische Parameter in den Daten hinterlegt sind. Die dynamische Lebenszyklusanalyse (DLCA) dagegen hinterlegt Zukunftsszenarien, um die Daten zu dynamisieren. Diese Arbeit untersucht konkret den Beitrag von Wärme- und Stromversorgung zu betriebsbedingten und materialgebundenen Emissionen anhand eines Mehrfamilienhauses in München. In der DLCA wird dabei der Dekarbonisierungspfad der Bundesregierung zur Klimaneutralität 2045 angenommen, wodurch die Energieversorgung immer weiter dekarbonisiert wird. Um den Einfluss der dynamischen CO₂-Emissionsfaktoren zu quantifizieren, wird erst eine statische und anschließend eine dynamische LCA in zwei Umsetzungsvarianten berechnet. Die erste Variante setzt den Fokus auf die Minimierung der betriebsbedingten Emissionen durch Eigendeckung des Energiebedarfs während der Nutzungsphase (*Variante Klimaneutralität im Betrieb – KNB-Variante*), wohingegen die zweite Variante die grauen Emissionen optimiert (*Variante Klimafreundliche Konstruktion – KFK-Variante*). Der statischen LCA liegen Datensätze aus der Ökobaudat zugrunde, während für die DLCA relevante Informationen aus der Datenbank Ecoinvent übertragen werden, um die Ökobaudat-Daten zu dynamisieren. In der statischen LCA ergeben sich für die KFK-Variante mit 7,1 kg CO₂-Äqv/m²a über den Lebenszyklus ca. 26 % weniger Emissionen als in der KNB-Variante mit 9,5 kg CO₂-Äqv/m²a. Legt man dem dynamische Emissionsfaktoren zugrunde, ergibt sich in der KNB-Variante eine Reduktion der Emissionen um 4 %, während in der KFK-Variante das Treibhausgaspotenzial um 22 % geringer ist. Diese deutliche Differenz ist einerseits auf die sinkenden Emissionsfaktoren des Stroms zurückzuführen, welche sich in der Nutzungsphase der KFK-Variante bemerkbar machen und andererseits auf die hohe Sensitivität der Abfallbehandlung nachwachsender Rohstoffe auf die CO₂-Intensität der Wärmeversorgung. Beide DLCA-Varianten stehen dabei nicht im Einklang mit der Erreichung des 1,5 °C-Ziels. Grundsätzlich liegen der Studie aber einige Vereinfachungen und Annäherungen zugrunde, sodass sich gewisse Unschärfen in den Ergebnissen ergeben. Ein großes Hindernis in der Umsetzung der DLCA stellt vor allem der Mangel an relevanten und konsistenten Daten dar.

Abstract

Regarding the proceeding global warming and the 1.5 °C target of the Paris Agreement, the relevance of life cycle assessment for future construction measures to investigate their climate impact is undeniable. However, this raises the question of the extent to which the current methodology of life cycle analysis (LCA) can represent future developments since so far only static parameters are incorporated in the data. Dynamic life cycle analysis (DLCA), on the other hand, deposits future scenarios to dynamize the data. This work specifically examines the influence of heat and power supply in operational and embodied emissions in the case of a multi-family house in Munich. In the DLCA, Germany's decarbonization pathway to climate neutrality in 2045 is assumed, whereby the energy supply is increasingly decarbonized. To quantify the influence of the dynamic CO₂ emission factors, first, a static and afterwards a dynamic LCA is calculated in two realization variants. The first variant focuses on minimizing the operational emissions by self-supply of the energy demand during the use phase (climate neutrality in operation - KNB variant), whereas the second variant optimizes the grey emissions (climate-friendly construction - KFK variant). The static LCA is based on data sets from the Ökobaudat, while relevant information for the DLCA is transferred from the Ecoinvent database to dynamize the Ökobaudat data. In the static LCA, the KFK variant with 7.1 kg CO₂-eqv/m²a results in approx. 26% fewer emissions over the life cycle than the KNB variant with 9.5 kg CO₂-eqv/m²a. If dynamic emission factors are applied, this results in a 4% reduction in emissions in the KNB variant, while in the KFK variant, the greenhouse gas potential is 22% lower. This significant difference is caused on the one hand by the decreasing emission factors of electricity, which are noticeable in the use phase of the KFK variant, and on the other hand by the high sensitivity of the waste treatment of renewable materials to the CO₂ intensity of the heat supply. Both DLCA variants are thereby not in line with the achievement of the 1.5 °C target. However, the study is based on a couple of simplifications and approximations, resulting in some uncertainties in the results. A major obstacle in the implementation of the DLCA is, above all, the lack of relevant and consistent data.

Abkürzungsverzeichnis

BEG EM	Einzelmaßnahmen der Bundesförderung für Energieeffiziente Gebäude
BNB	Bewertungssystem nachhaltiges Bauen
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äqv.	CO ₂ -Äquivalente
DAV	Deutscher Alpenverein
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DLCA	Dynamische Lebenszyklusanalyse
EoL	Lebensende (End of Life)
EPD	Umweltproduktdeklaration (Environmental Product Declaration)
GWP	Global Warming Potential
ISO	Internationale Organisation für Normung
KFK-Variante	Variante <i>Klimafreundliche Konstruktion</i>
KNB-Variante	Variante <i>Klimaneutralität im Betrieb</i>
KSG	Klimaschutzgesetz
KSP	Klimaschutzplan
LCA	Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment)
PE	Polyethylen
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
SLCA	Statische Lebenszyklusanalyse
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgase
VHF	Vorgehängte hinterlüftete Fassade
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WLG	Wärmeleitgruppe
XPS	Extrudiertes Polystyrol

Glossar

Abschneidekriterium

Festlegung der Stoffmenge, eines Energieflusses oder des Grades von Umweltrelevanz, die/der mit Prozessmodulen oder Produktsystemen verbunden sind, welche von einer Studie auszuschließen sind

Allokation

Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen (DIN EN ISO 14040)

Charakterisierungsfaktor

Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird (DIN EN ISO 14040)

Emissionsfaktor

Höhe der durch einen Energieträger verursachten Emissionen bezogen auf eine Einheit Endenergie. Neben dieser inputbezogenen Betrachtung (g/kWh Endenergie) kann der Emissionsfaktor aber auch auf den Produktausstoß bezogen werden (g/kWh_{el}). Emissionsfaktoren sind zudem immer prozess- und anlagenspezifisch. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz [BMWK], o. J.b)

Funktionelle Einheit

Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit (DIN EN ISO 14040)

Graue Energie / graue Emissionen

Als graue Energie bezeichnet man den Energieaufwand, der über den gesamten Lebenszyklus der eingesetzten Materialien benötigt wird. Aus dem Anteil des nicht erneuerbaren Energieaufwands und den sogenannten prozessbedingten Emissionen resultieren Treibhausgasemissionen, die als graue Emissionen bezeichnet werden. (Gebäudeforum Klimaneutral, 2022)

Lebensweg

Aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung (DIN EN ISO 14040)

Ökobilanz / Life Cycle Assessment (LCA)

Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenszyklus (DIN EN ISO 14040)

Produktsystem

Zusammenstellung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt (DIN EN ISO 14040)

Sachbilanz

Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst (DIN EN ISO 14040)

Sensitivitätsanalyse

Systematisches Verfahren zur Einschätzung der Wirkungen der getroffenen Auswahl an Methoden und Daten auf die Ergebnisse einer Studie (DIN EN ISO 14040)

Systemgrenze

Grenze, die basierend auf einer Reihe von Kriterien festlegt, welche Prozessmodule Teil des untersuchten Systems sind (DIN EN ISO 14040)

Treibhauspotenzial / Global Warming Potential (GWP)

Maßzahl für den relativen Beitrag einer chemischen Verbindung zur globalen Erwärmung. Sie gibt an, wie viel eine bestimmte Menge eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Menge Kohlendioxid (CO₂) über einen Zeitraum von hundert Jahren zum Treibhauseffekt beiträgt (BauNetz, o. J.)

U-Wert

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert, früher k-Wert) beschreibt, wie viel Wärme (in Watt) pro Fläche durch ein Bauteil bei einer bestimmten Temperaturdifferenz (in Kelvin) fließt. Die Maßeinheit des U-Wertes ist W/m^2K . Der U-Wert wird über die Dicke und die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Schichten sowie über den Wärmeübergang an den Oberflächen des Bauteils ermittelt. Je niedriger der Wärmedurchgangskoeffizient ist, desto besser sind die Wärmedämmungseigenschaften eines Bauteils. (Co2online, o. J.)

Wirkungsabschätzung

Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient (DIN EN ISO 14040)

Wirkungsindikator

Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie (DIN EN ISO 14040)

Wirkungskategorie

Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können (DIN EN ISO 14040)

1. Einleitung

Der Klimawandel stellt gegenwärtig eine der größten Herausforderungen der Menschheit dar. Gegenüber der vorindustriellen Zeit stehen wir heute bei einer mittleren globalen Erwärmung von 1,1 °C, was zu folgenschweren Veränderungen in der Natur führt und die Lebensgrundlagen vieler Menschen gefährdet. Jede weitere Tonne an emittierten Treibhausgasen (THG) verstärkt den Effekt, weswegen eine Begrenzung der Emissionen unweigerlich nötig wird. (Masson-Delmotte et al., 2021, S. 5, 30 - 31) Um den Klimawandel einzudämmen und seine Auswirkungen zu minimieren, haben sich bei der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris 197 Staaten auf ein globales Klimaschutzabkommen geeinigt. Ziel dessen ist die Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C mit Bemühungen, eine Beschränkung von 1,5 °C einzuhalten. (BMWK, o. J.a)

Die Bundesregierung hat sich außerdem das Ziel gesetzt, Deutschland bis 2045 in die Klimaneutralität zu führen. (Bundesregierung, 2022) In diesem Transformationspfad spielt auch das Baugewerbe eine entscheidende Rolle, da es für ca. ein Drittel der nationalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Auch der Ressourcenverbrauch und das Abfallaufkommen durch den Gebäudesektor sind enorm. Die Baustoffindustrie hat dementsprechend einen beachtlichen Anteil an den Emissionen. (Schubert et al., 2023, S. 8) Diese Gegebenheiten bieten jedoch gleichzeitig eine große Chance. Hohe Minderungspotenziale in der Baustoffindustrie bestehen z. B. einerseits in der Verwendung von Baustoffen mit geringer CO₂-Bilanz und andererseits in der Entwicklung von klimaverträglichen und emissionsarmen Herstellungsverfahren. (Nissler, 2022, S. 11) In der Nutzungsphase können Energieeffizienz und der Umstieg auf erneuerbare Energien zur Treibhausgasneutralität führen. (Schubert et al., 2023, S. 11) Die Verringerung des Kohlenstoff-Fußabdrucks der bebauten Umwelt ist jedenfalls ein wichtiger Schritt, um die kurz-, mittel- und langfristigen Ziele der Bundesregierung und die Begrenzung der globalen Erwärmung zu erreichen. Als Entscheidungsinstrument in Bezug auf die Klimawirkung von Baumaßnahmen kann die Ökobilanzierung dienen. Diese ermöglicht es, die Auswirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung auf die Umwelt zu quantifizieren und zu bewerten. (Braune, Ruiz Durán & Gantner, 2018, S. 4)

2. Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die Ökobilanz bzw. Life Cycle Assessment (LCA) ist ein wichtiges Werkzeug, um die Umweltwirkungen aller möglichen Planungsaspekte in Neubau- und Sanierungsvorhaben beurteilen zu können. Sie dient damit dem Bauherrn während Planung und Ausführung vor allem in Sachen Nachhaltigkeit als Entscheidungshilfe. (Braune et al., 2018, S. 3) In dieser Arbeit werden zwei Sanierungsvarianten bezogen auf ihre Klimawirkung ökobilanziell miteinander verglichen: die Variante *Klimaneutralität im Betrieb* und die Variante *Klimafreundliche Konstruktion*. Da in den letzten Jahrzehnten in Anbetracht der Dringlichkeit noch zu wenig Ambitionen gezeigt wurden, die Treibhausgasemissionen zu verringern (Masson-Delmotte et al., 2021, S. 14), wird es heute wichtiger denn je, die Umweltwirkungen von Baumaßnahmen im Vorhinein abschätzen und in das Gesamtsystem einordnen zu können.

Doch es ist fraglich, ob die aktuelle Methodik in der LCA die künftigen Entwicklungen, welche stark von nationaler und internationaler Politik abhängig sind, überhaupt abbilden kann. Die aktuell vorherrschende Praxis der Ökobilanzierung legt der Berechnung vorwiegend statische Parameter zugrunde. In der Literatur ist man sich dementsprechend einig, dass die künftige Entwicklung damit nicht abgebildet werden kann und die Ergebnisse somit vor allem bei Produkten mit langer Lebensdauer wie es Gebäude sind, deutliche Defizite aufweisen. (Resch, Andresen, Cherubini & Brattebø, 2021; Su, Zhang, Zuo, Li & Yuan, 2021; De Wolf, Pomponi & Moncaster, 2017; u. v. m.) Die dynamische Lebenszyklusanalyse (DLCA) nimmt sich dieser Problematik an und wird mit Zukunftsszenarien anstatt statischer Parameter hinterlegt, wodurch zuverlässigere Ergebnisse erzielt werden können (Su et al., 2021, S. 26200). In dieser Arbeit soll der Einfluss von Strom und Wärme über den Lebensweg eines Gebäudes untersucht werden, vor allem in Anbetracht der Tatsache, dass diese in Zukunft immer weiter dekarbonisiert werden. Dies nimmt ebenso Einfluss auf die grauen Emissionen. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass die *Implementierung des dynamischen Ansatzes in die konventionelle LCA-Methodik die theoretisch bilanzierten CO₂-Emissionen über den Lebensweg durch den steigenden Anteil an erneuerbaren Energien in der Strom- und Wärmeversorgung reduziert*. Entsprechend sollen die folgenden beiden Forschungsfragen untersucht werden: *Wie verändert die Implementierung dynamischer Emissionsfaktoren die Ergebnisse einer statischen, CO₂-orientierten LCA bei zwei unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen? Wo liegen die Grenzen bei der Anwendung der DLCA?* Zielsetzung der Studie ist

es also, die Umweltwirkungen beider Sanierungsvarianten in je zwei Berechnungsvarianten (statische LCA und DLCA) miteinander zu vergleichen, um erstens eine Entscheidungshilfe zu liefern, wo die Schwerpunkte beim Vorgehen gesetzt werden sollten und zweitens den Einfluss der dynamischen Emissionsfaktoren von Strom und Wärme über den gesamten Lebensweg quantifizieren zu können. Wie oben beschrieben, muss aber auch eine quantitative Einordnung der Ergebnisse in den klimapolitischen Kontext vorgenommen werden. Es wird die Hypothese aufgestellt, *dass beide DLCA-Varianten im Einklang mit der Erreichung des 1,5 °C-Ziels stehen, welches im Pariser Klimaabkommen 2015 festgeschrieben wurde*. Hinter dieser Hypothese steht die Forschungsfrage: *Was bedeuten die Untersuchungsergebnisse der DLCA für die Erreichung der internationalen Klimaziele?* Am Ende der Arbeit findet also für beide Sanierungsvarianten eine Einordnung statt, ob die Ambitionen in den Baumaßnahmen ausreichend sind, um in Einklang mit den Pariser Klimazielen zu stehen.

3. Vorgehensweise und Methodik

Die Grundlagen zur Thematik Ökobilanz, DLCA und zum Stand der Technik und Forschung legt Kapitel 4. Hier werden statische und dynamische LCA voneinander abgegrenzt, DLCA definiert, Schlüsselparameter in einer DLCA vorgestellt sowie vorherrschende Umsetzungsschwierigkeiten aufgeführt. Eine systematische Literaturrecherche in den Datenbanken *Web of Science* und *Scopus* hilft dabei, diese inhaltliche Basis zu schaffen. Mittels einer Übersichtstabelle in Excel wird sämtliche relevante Literatur mit Suchparametern und thematischer Einordnung dokumentiert.

Darauf basierend findet anschließend die ökobilanzielle Untersuchung zweier Sanierungsvarianten statt. Anhand eines Mehrfamilienhauses in München werden die Varianten *Klimaneutralität im Betrieb* und *Klimafreundliche Konstruktion* miteinander verglichen, welche in Kapitel 5.1.2 und 5.1.3 genauer vorgestellt werden. Die ökobilanzielle Betrachtung beschränkt sich dabei nur auf die Klimawirkung, also den Wirkungsindikator Global Warming Potential (GWP). Im ersten Schritt der Ökobilanz wird eine statische LCA anhand der Vorgaben des Kriteriums *ENV1.1 Ökobilanz des Gebäudes* im Kriterienkatalog zur Gebäudesanierung der DGNB (DGNB GmbH, 2021) durchgeführt. Dieser liefert unter anderem auch den Grenzwert für die konstruktionsbedingten Emissionen für die Variante *Klimafreundliche Konstruktion*. Die Datensätze für die statische Ökobilanz stammen aus der Ökobaudat, welche auf der Hintergrunddatenbank *GaBi* basiert. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen [BMWSB], o. J.a)

GaBi ist nicht nur eine Datenbank, sondern auch ein Programm, in dem Datensätze durch die Zusammensetzung von Einzelprozessen erstellt werden. Dies ist eine grundlegende Anforderung für die Umsetzung einer DLCA, da sich die Ergebnisse nur so auf die einzelnen Prozesse zurückverfolgen lassen (vgl. Kapitel 4) und somit der Einfluss von Strom und Wärme am GWP in der Produktherstellung quantifiziert werden kann. Im Programm selbst könnte dann die Klimawirkung der Energieversorgung in den bereits vorhandenen Ökobaudat-Datensätzen bearbeitet werden und somit neue dynamische Ergebnisse für jedes Produktsystem erzielt werden. Um in der Datenbasis bei statischer und dynamischer LCA konsistent zu bleiben, sollte für die Durchführung der DLCA demzufolge ursprünglich ebenso mit der Hintergrunddatenbank und dem Programm umgesetzt werden. Nachdem aber die lizenzierte Vollversion überprüft worden ist, wird festgestellt, dass die Ökobaudat-Datensätze auch hier nur als statische Sachbilanzdaten

zur Verfügung gestellt werden, ohne die Einflüsse der Einzelprozesse an den Umweltwirkungen aufzuführen. Damit genügen diese Daten den Anforderungen für diese Arbeit nicht. Die Entscheidung fällt dementsprechend schlussendlich auf die zusätzliche Verwendung der Datenbank Ecoinvent, die diese Informationen liefert (vgl. Abb. 1).

IPCC 2021, climate change, global warming potential (GWP100): 0.274 kg CO2-Eq

Exchange	Amount	Impact (kg CO2-Eq)	Impact %
heat, district or industrial, other than natural gas market for heat, district or industrial, other than natural gas - RoW	1.1 MJ	0.12	43.98%
stucco market for stucco - GLO	0.71 kg	0.0709	25.9%
electricity, medium voltage market group for electricity, medium voltage - RAS	0.0469 kWh	0.0433	15.8%
waste paper, sorted market for waste paper, sorted - GLO	0.15 kg	0.0122	4.45%
electricity, medium voltage market group for electricity, medium voltage - RNA	0.0164 kWh	0.00721	2.63%
potato starch market for potato starch - GLO	0.0029 kg	0.0048	1.75%

Abb. 1: Auszug aus Ecoinvent-Datensatz zur Herstellung von 1 kg Gipsfaserplatte (ecoinvent, o. J.)

Im folgenden Absatz wird die methodische Umsetzung der DLCA sukzessiv beschrieben. Eine Veranschaulichung der Vorgehensweise bietet außerdem Abb. 2.

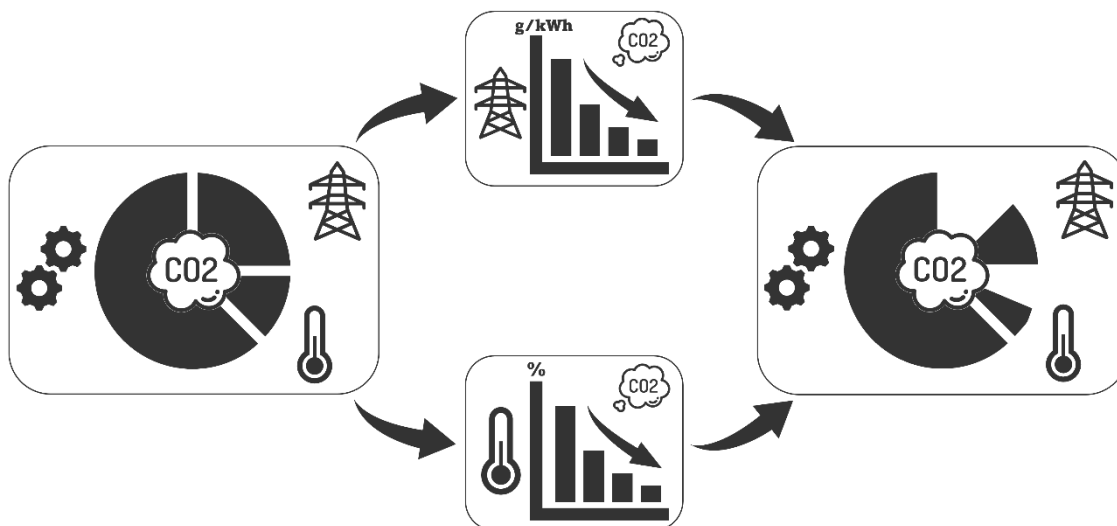


Abb. 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise in der DLCA

Im ersten Schritt werden die benötigten Informationen aus Ecoinvent auf die Datensätze der Ökobaudat, welche in der statischen LCA verwendet werden, übertragen. Damit werden also nicht zwei Datenbanken vermischt, was die Konsistenz der Studie beeinträchtigen würde, sondern lediglich die für die Umsetzung einer DLCA notwendigen Daten übernommen. Konkret handelt es sich dabei um den prozentualen Anteil des Strom- bzw. Wärmebedarfs für die Produktion oder Entsorgung eines Baustoffes am GWP. Der Prozentsatz wird auf die statischen Ökobaudat-Datensätze übertragen. Dadurch kann das GWP, welches aufgrund von Strom- oder Wärmeversorgung im Referenzjahr des Datensatzes anfällt, berechnet werden. Im zweiten Schritt werden die Emissionen der Energieversorgung mit Strom und Wärme anhand der Reduktionsziele Deutschlands für jedes künftige Jahr bis zum Lebenswegende neu modelliert. Für den Stromsektor können damit spezifische CO₂-Emissionsfaktoren je kWh Strom angesetzt werden. Im Wärmesektor dagegen muss ein Umweg über die prozentuale Reduktion der Emissionen gegangen werden, da hier die spezifischen Emissionsfaktoren je MJ thermischer Energie abhängig vom Anwendungsfall und Energieträger und somit nicht allgemein ansetzbar sind. Im dritten Schritt kann anschließend eine Remodellierung der Datensätze mit Berücksichtigung dynamischer Emissionsfaktoren stattfinden. Wird die Energieversorgung in Zukunft dekarbonisiert, fallen GWP-Anteile von Strom und Wärme immer geringer aus bzw. werden schließlich auf null reduziert. Die verbleibenden Restemissionen, welche außerdem während der Verarbeitung des Produkts anfallen und z. B. auf Vorprodukte zurückzuführen sind, werden dagegen als über die Zeit gleichbleibend angenommen. Je nach Zeitpunkt der Baustoffherstellung oder -entsorgung ist der CO₂-Ausstoß durch die Verarbeitung eines Bauproduktes also variabel.

Alle Berechnungsschritte erfolgen in Microsoft Excel. Eine Beispielrechnung zur Implementierung der dynamischen Emissionsfaktoren in den Lebensweg anhand eines konkreten Bauprodukts ist in Anhang 1 zur Veranschaulichung hinterlegt. Diese Vorgehensweise wird auf alle Bauprodukte angewendet, bei denen zu den verwendeten Ökobaudat-Datensätzen passende Ecoinvent-Daten vorhanden sind. Über den Lebensweg betrachtet ist eine Umsetzung der DLCA in der Herstellungsphase (A), in der Abfallbehandlung (C3) und -beseitigung (C4) und somit auch beim Austausch von Bauprodukten (B4) grundsätzlich möglich. Vorteile und Belastungen über den Lebensweg hinaus (D) können aufgrund der fehlenden Datenbasis in der Ecoinvent nicht dynamisch betrachtet werden und werden daher weiterhin statisch mit einberechnet.

Zur Umrahmung der Arbeit werden die Ergebnisse schlussendlich in den politischen Kontext der Klimaziele von Paris gesetzt. Das durch die Grad-Ziele vorgegebene verbliebene CO₂-Budget wird übersetzt in Emissionsgrenzwerte für den Sektor Wohnen. Anschließend werden die Ergebnisse der DLCA den Pariser Richtwerten gegenübergestellt. So kann letztendlich eine Abschätzung gegeben werden, welche Sanierungsmaßnahme zu favorisieren ist und ob die Anstrengungen bzgl. des klimafreundlichen Bauens ausreichen, um mit den internationalen Klimazielen konform zu sein.

4. Stand der Technik und der Forschung im Bereich der DLCA

Graue Emissionen kommen durch die steigende Energieeffizienz im Gebäudesektor immer mehr zum Tragen und gewinnen an Relevanz (Röck et al., 2022, S. 4). Damit steigt auch die Wichtigkeit der Bilanzierung dieser mithilfe der Ökobilanz. Obwohl die LCA von Gebäuden inzwischen weltweit verbreitet ist und in der Baupraxis als Richtschnur für Entscheidungen dient (Negishi, Tiruta-Barna, Schioppa, Lebert & Chevalier, 2018, S. 613), ergeben sich aus der gängigen Methodik noch einige Einschränkungen. Die gewöhnliche Ökobilanz verwendet stationäre Randbedingungen, was bedeutet, dass die Sachbilanzergebnisse nicht in einen zeitlichen Kontext eingeordnet werden. Umwelteingriffe werden unabhängig vom Zeitpunkt bilanziert und daher jederzeit als gleichwertig betrachtet. (Negishi et al., 2018, S. 613) In der Literatur wird diese vorherrschende Methodik als statische Ökobilanz (SLCA) bezeichnet, um sie von der Begrifflichkeit der dynamischen Ökobilanz abzugrenzen. Obwohl SLCA keine allgemein gültige Abkürzung ist, wird diese dennoch in der vorliegenden Arbeit als Pendant zu DLCA verwendet. Unsicherheiten in der SLCA entstehen vor allem beim Produktsystem Gebäude, da sich während dessen langer Lebensdauer Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft stark verändern können und somit die Umweltwirkung des Gebäudes erheblich beeinflusst wird (Su, Li, Zhu & Lin, 2017, S. 310–311). Die Herstellungsphase liegt i. d. R. sehr nahe am Bewertungszeitpunkt. Die zeitlich bedingten potenziellen Schwankungen der Umweltwirkungen sind daher voraussichtlich gering und können vernachlässigt werden. Hier kann es sinnvoll sein, bereits vorhandene Daten von statischen Ökobilanz-Datenbanken zu verwenden. Werden später im Lebensweg Komponenten erneuert, hat die Berechnung mit dynamischen Parametern großen Einfluss auf die grauen Emissionen, besonders bei regelmäßig auszutauschenden Komponenten. Auch Abriss und Entsorgung finden i. d. R. erst mehrere Jahrzehnte nach dem Bewertungszeitpunkt statt. Die Umweltwirkungen durch diese Aktivitäten berechnet zum Bewertungszeitpunkt oder zum realen Zeitpunkt des End of Life (EoL) können daher sehr stark voneinander abweichen. (Su, Li & Zhu, 2019, S. 251–252) In der Literatur ist man sich einig, dass die Nichtberücksichtigung zeitlicher Parameter die Genauigkeit der Ergebnisse verringert (Filleti, Silva, Silva & Ometto, 2014; Asdrubali, Baggio, Prada, Grazieschi & Guattari, 2020; Su et al., 2021; u. v. m.) und folglich die Relevanz und Aussagekraft von Ökobilanzierungen einschränkt (Su et al., 2021; Resch et al., 2021). Auch die

ISO selbst weist darauf hin, dass durch die fehlende zeitliche Dimension der Umweltbezug bis zu einem gewissen Grad gemindert wird (DIN EN ISO 14040, S. 26). Um also den gesamten Lebensweg von Gebäuden bewerten zu können, werden Szenarien und Annahmen besonders für die Nutzungsphase und das Lebensende erforderlich (De Wolf et al., 2017, S. 77). Die Ergebnisse einer statischen Ökobilanz können aufgrund der langen Lebensdauer erheblich von den Ergebnissen einer dynamischen Ökobilanz abweichen (Asdrubali et al., 2020, S. 2). Vor allem wegen der hohen Bedeutung, die Gebäuden in Bezug auf Emissionsminderung zukommt und ihrer wichtigen Rolle bei der Erreichung von Klimaschutzziele, sind genaue Bewertungsergebnisse notwendig. Die Implementierung von dynamischen Parametern in die Ökobilanz ist damit äußerst sinnvoll und notwendig (Su et al., 2021, S. 26200) und hat sich folglich in den letzten Jahren zu einem wachsenden Forschungsgebiet entwickelt (Su et al., 2019, S. 248). Collinge et al. definieren die DLCA als „Ansatz der Ökobilanzierung, der explizit die dynamische Prozessmodellierung im Kontext zeitlicher und räumlicher Variationen der umgebenden Industrie- und Umweltsysteme einbezieht“ (Übersetzt aus Collinge, Landis, Jones, Schaefer & Bilec, 2013, S. 538).

Eine DLCA ist sehr facettenreich und kann viele verschiedene dynamische Parameter untersuchen. Negishi et al. (2018, S. 619) fassen diese zeitlichen Variablen in drei Gruppierungen zusammen. Die erste ist die Gebäudeebene selbst: Die technische Leistung von baulichen Komponenten und energetischen Anlagen nimmt mit der Zeit ab, wodurch Modernisierungen und Erneuerungen notwendig werden. Beides beeinflusst den Energieverbrauch. Eine DLCA muss folglich sowohl die Verschlechterungen des Gebäudezustands über den Lebensweg hinweg als auch die technologischen Verbesserungen zu bestimmten Zeitpunkten in Betracht ziehen. Die zweite Gruppierung bildet der Gebäudenutzer. Der Energieverbrauch ändert sich mit dem Bewohner und seinem Verhalten und ist daher z. B. abhängig von Familiengröße, Dauer von An- und Abwesenheiten, thermischem Komfort des Nutzers, Umweltbewusstsein, etc. Als Ergänzung dazu muss eine DLCA drittens auch das Hintergrundsystem eines Gebäudes betrachten. Dazu gehören die Veränderung von Energieversorgung, klimatischer Bedingungen und politischer Vorgaben, welche sich wiederum nicht nur auf die technische Leistung des Gebäudes, sondern auch auf das Nutzerverhalten auswirken. In diese Gruppierung ist außerdem auch der technologische Fortschritt in der Produktion einzuordnen. Steigende Energie-, aber auch Materialeffizienz, erhöhte Recyclingraten oder veränderte Materialzusammensetzungen können Ressourcen- und Energieverbrauch durch Bauprodukte erheblich verändern (Su et al., 2017, S. 315–317). Su et al. (2019, S. 250) bringen

zudem noch dynamische Charakterisierungs- und Gewichtungsfaktoren als integrale Bestandteile einer LCA ins Spiel. Die Bewertung verschiedener Emissionen anhand ihrer Umweltwirkung findet mittels Charakterisierungsmodellen statt. Der Charakterisierungsfaktor von Schadstoffen variiert aber in Zeit und Raum, z. B. je nach atmosphärischer Zusammensetzung. Es kann folglich nicht zwingend davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen einer Emissionseinheit heute und in Zukunft die gleichen sind. Gewichtungsfaktoren dagegen werden mit Parametern berechnet, welche von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft abhängig und somit durchaus zeitlich variabel sind. Wegen der langen Lebensdauer eines Gebäudes kann wiederum nicht davon ausgegangen werden, dass die Werteentscheidungen zum Bilanzierungszeitpunkt über den gesamten Zeitraum bestehen bleiben. Angesichts der vielen dynamischen Variablen, ist es kaum überraschend, dass die bisher durchgeführten DLCA-Studien sich meist auf nur wenige Parameter fokussieren und die anderen Variablen nach der herkömmlichen Methodik als statisch ansetzen (Potrč Obrecht, Jordan, Legat & Passer, 2021; Asdrubali et al., 2020) oder lediglich ein theoretisches Rahmenwerk für die Implementierung liefern (Su et al., 2017; Negishi et al., 2018).

Ein großes Hindernis in der Umsetzung der DLCA stellt vor allem der Mangel an relevanten und konsistenten Daten dar (Negishi et al., 2018, S. 613), aber auch die noch unzureichende Anzahl an Studien (Su et al., 2017, S. 317). Im System Gebäude werden dabei zusätzliche Schwierigkeiten identifiziert: Erstens ist der Lebensweg eines Gebäudes weitaus länger als bei anderen Produkten, wodurch die Veränderungen über diese Zeit durchaus beträchtlich sein können und schwerer abzuschätzen sind (Su et al., 2021, S. 26200). Zweitens sind Gebäude durch die Vielzahl an Materialien mit jeweils unterschiedlichen Produktionsprozessen und Lebensdauern ohnehin schon eine sehr komplexe Anwendung der LCA. Durch Instandhaltungs- und Nachrüstungsmaßnahmen können sich Komponenten in Form und Funktion verändern. Die damit verbundenen zeitlichen Variationen sind vielfältig, komplex und mit großen Unsicherheiten behaftet. Der Mehraufwand bei Datenerfassung, -analyse und -interpretation erhöht sich enorm und die Komplexität der Berechnung steigt drastisch. (Breton, Blanchet, Amor, Beauregard & Chang, 2018, S. 19) Für eine dynamische Ökobilanz müsste die zeitliche Entwicklung der dynamischen Parameter bekannt sein. Außerdem werden dynamische Daten für Sachbilanz und Wirkungsabschätzung notwendig, welche für jedes Jahr (bzw. jeden festgelegten Zeitschritt) vorhanden sein müssten (Resch et al., 2021, S. 2). In den bestehenden LCA-Datenbanken und Ökobilanz-Programmen sind diese Daten aber nicht direkt verfügbar (Su et al., 2021, S. 26211). Derzeit werden die Sachbilanzdaten

auf Grundlage von industriellen oder regionalen Durchschnittswerten aus der bisherigen Entwicklung abgeleitet und ändern sich bei Aktualisierung mit der aktuell vorherrschenden Technologie. Künftige Entwicklungen werden dadurch aber nicht abgebildet. (Su et al., 2019, S. 250) Um dynamische Datenbanken bzw. eine dynamische Sachbilanz erstellen zu können, müssen Datensätze vorhanden sein, bei denen die Modellierung der Einzelprozesse auslesbar und somit rückverfolgbar ist (Unit Process Datensätze). Nur dann kann eine Ummodellierung der Datensätze ausgeführt werden. Häufig werden von Datenbanken aber nur aggregierte Datensätze zur Verfügung gestellt, da die Datenmengen dann deutlich geringer und die Informationen leichter zu handhaben sind. (Potrč Obrecht et al., 2021, S. 842–843) Zusätzlich zu den dynamischen Datenbanken fehlt es an Berechnungsinstrumenten, wie passender Software, aber vor allem auch an einer allgemeinen Methodik der Durchführung (Negishi et al., 2018, S. 615). Insgesamt kann man sagen, dass sich der dynamische Ansatz in der Ökobilanzierung noch in der Entwicklung befindet. Sein Potenzial ist noch nicht vollständig erfassbar und ebenso wenig ausgeschöpft. Um die DLCA voranzubringen, müssen also noch zahlreiche Fallstudien in den verschiedenen Bereichen durchgeführt werden. (Negishi et al., 2018, S. 619)

Alle Aspekte, die in eine DLCA miteinbezogen werden sollten, können im Rahmen einer Masterarbeit aufgrund des Aufwands, aber auch wegen der hohen Umsetzungsschwierigkeiten nicht betrachtet werden. Diese Arbeit befasst sich folglich nur mit einem Parameter und seiner künftigen Entwicklung. Es wird lediglich die Energieversorgung mit Strom und Wärme untersucht und wie die Entwicklung dieser in betriebsbedingte und graue Emissionen zu integrieren ist. Es wird ein dynamischer Energiemix hinterlegt, was bedeutet, dass sich die Zusammensetzung der Energieversorgung z. B. durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien mit der Zeit ändert. In der bisherigen LCA-Praxis wird die Dekarbonisierung der Stromversorgung auch in der Nutzungsphase oftmals nicht mit betrachtet, obwohl die Hinterlegung des Stromverbrauchs im Betrieb mit Strommix-Szenarien einfach umsetzbar wäre. Stattdessen wird die momentan vorherrschende Situation auf den gesamten Lebensweg übertragen. (De Wolf et al., 2017, S. 77) Dies kann zu einer Überschätzung des GWPs in der Nutzungsphase bis zu ca. 60 % führen. (Ramon & Allacker, 2021, S. 126624) Vor allem bei Gebäuden, welche auf Strom als Hauptenergieträger angewiesen sind, würde sich die Dekarbonisierung der Stromversorgung in den Ergebnissen bemerkbar machen (Asdrubali et al., 2020, S. 1). In der Studie von Potrč Obrecht et al. (2021) wurde der Beitrag des Strommixes in den grauen Emissionen untersucht. Dies geschah anhand eines Beispiel-Gebäudes in

Slowenien mit dem Fokus auf die Treibhausgasemissionen in der Herstellungsphase. Wird der nationale Strommix nicht nur im Hauptproduktionsprozess zum finalen Produkt, sondern auch in den Prozessen zu den Vorprodukten in die Betrachtung mit einbezogen, beträgt sein Einfluss in der Studie je nach Materialkomponente bis zu 20 %. In den Ergebnissen lässt sich auch feststellen, dass der relative Beitrag des Strommixes zu den Gesamtemissionen des Baustoffs steigt bzw. sinkt, wenn der hinterlegte Strommix eine größere bzw. geringere Umweltwirkung aufweist.

Ähnliche Ergebnisse für den Bereich der thermischen Energie und dessen Einfluss auf die grauen Emissionen in der Baustoffproduktion sind in der Literatur bisher nicht zu finden. Ein Grund dafür könnte sein, dass der Primärenergieträger zur Erzeugung thermischer Energie je nach Anwendungsfall variiert. Damit muss für den Einzelfall je nach Einsatzbereich und Energieträger ein spezifischer Emissionsfaktor verwendet werden, der nicht wie der Strommix national gültig und ansetzbar ist. Außerdem findet ebenso wenig eine stetige Dekarbonisierung statt, sondern eine Reduktion der THG-Emissionen tritt in diesem Bereich i. d. R. in Kombination mit einem Energieträgerwechsel auf (Gerhardt et al., 2017, S. 31–32). Zeitpunkt und genaue Umsetzung solcher Maßnahmen sind wohl schwer abzuschätzen und erfordern vor allem in Anbetracht der Anzahl der Bauprodukte in einem Gebäude enormen Aufwand. Dies erschwert die Umsetzung einer DLCA mit Betrachtung von CO₂-Faktoren thermischer Energie beachtlich.

5. Statische LCA – Vergleich der Sanierungsvarianten

Dieses Kapitel deckt die vollständige Berechnung und Ergebnisauswertung der statischen Lebenszyklusanalyse ab. In Kapitel 5.1 werden die Rahmenbedingungen und Systemgrenzen der Berechnung aufgeführt. Anschließend wird in Kapitel 5.2 die Sachbilanz ermittelt, welche alle grundlegenden Berechnungen für die Ergebnisauswertung der LCA liefert. Diese beinhaltet u. a. die Energiebedarfsberechnung und die Massenbilanzierung, welche die Basis der Ermittlung betriebs- und materialbedingter Emissionen bilden. In den darauffolgenden Kapiteln 5.3 und 5.4 wird die Klimawirkung der Sanierungsmaßnahmen innerhalb der Berechnung mit statischen Parametern abgeschätzt und die Ergebnisse interpretiert.

5.1. Ziel und Untersuchungsrahmen in der statischen LCA

Zielsetzung in Kapitel 5 ist die Durchführung einer statischen Ökobilanz zum Vergleich zweier Sanierungsvarianten. Damit soll eine klare Handlungsempfehlung in Bezug auf treibhauswirksame Emissionen ausgesprochen werden. Außerdem sollen die Ergebnisse zum Vergleich mit der dynamischen Berechnungsmethodik herangezogen werden. Die in diesem Kapitel behandelten Grundlagen gelten auch für die DLCA. Da die Masterthesis veröffentlicht wird, dienen die Ökobilanz-Ergebnisse nicht nur Interessierten des Lehrstuhls und dem Bauherrn selbst, sondern auch anderen Bauherr*innen, Architekt*innen und Entscheider*innen, welche die Ergebnisse als Richtschnur verwenden können.

5.1.1. Vorstellung des Untersuchungsgebäudes

Als Objekt für die ökobilanzielle Vergleichsuntersuchung dient eine Liegenschaft des Deutschen Alpenvereins (DAV) in der Von-Kahr-Str. 2 - 4 in München. Die ehemalige Bundesgeschäftsstelle des DAVs besteht aus drei Bürogebäuden mit Verbindungsbau. Das Hauptgebäude, welches in dieser Arbeit untersucht wird, wurde 1975 errichtet (östlich im Grundstück liegend, vgl. Abb. 3). Die Grundrisspläne des Bestandsgebäudes sind im Anhang 11 zu finden. 2004 erfolgte ein Umbau dessen sowie eine Erweiterung um den Verbindungsbau und die beiden kleineren Blockgebäude (westlich im Grundstück liegend, vgl. Abb. 3).

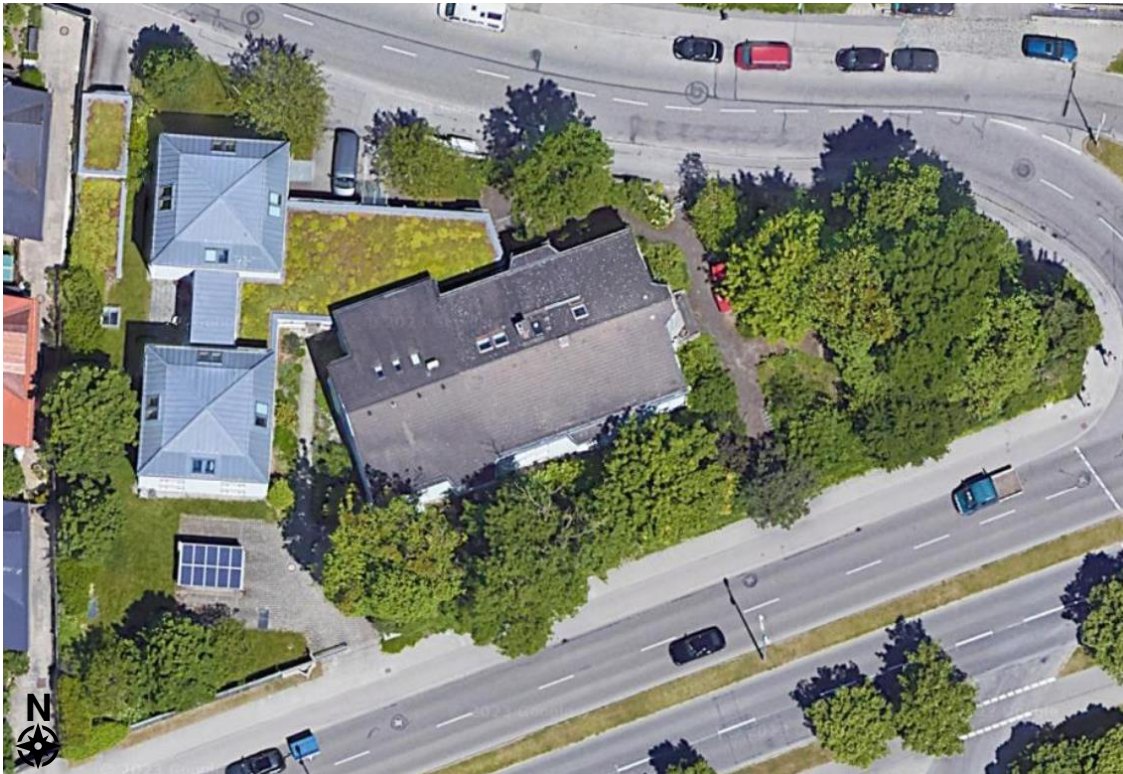


Abb. 3: Luftaufnahme der Liegenschaft (Google)

Da das Baugrundstück in Untermenzing als „Allgemeines Wohngebiet“ ausgewiesen ist, soll nun eine Umnutzung von einem Nichtwohngebäude zu einem Wohngebäude stattfinden. (Deutscher Alpenverein [DAV], 2021, S. 5) Als Entscheidungshilfe bei der Umbaumaßnahme wurde bereits ein Wettbewerb zu verschiedenen Sanierungs-, Nachverdichtungs- und Neubauvarianten durchgeführt. Die Entscheidung des DAVs fällt dabei auf eine Sanierungsvariante des Architekturbüros *Schankula Architekten*, von welchem die in der Arbeit verwendeten Sanierungspläne stammen. Der vollständige maßstabsgetreue Plansatz liegt ebenfalls in Anhang 11 vor. Die wichtigsten Pläne sind außerdem in Abb. 4 bis Abb. 7 aufgeführt. Das Gebäude in der Von-Kahr-Straße wird in Zukunft ein Mehrfamilienhaus mit neun Wohneinheiten sein, in dem insgesamt 26 Personen Platz finden.

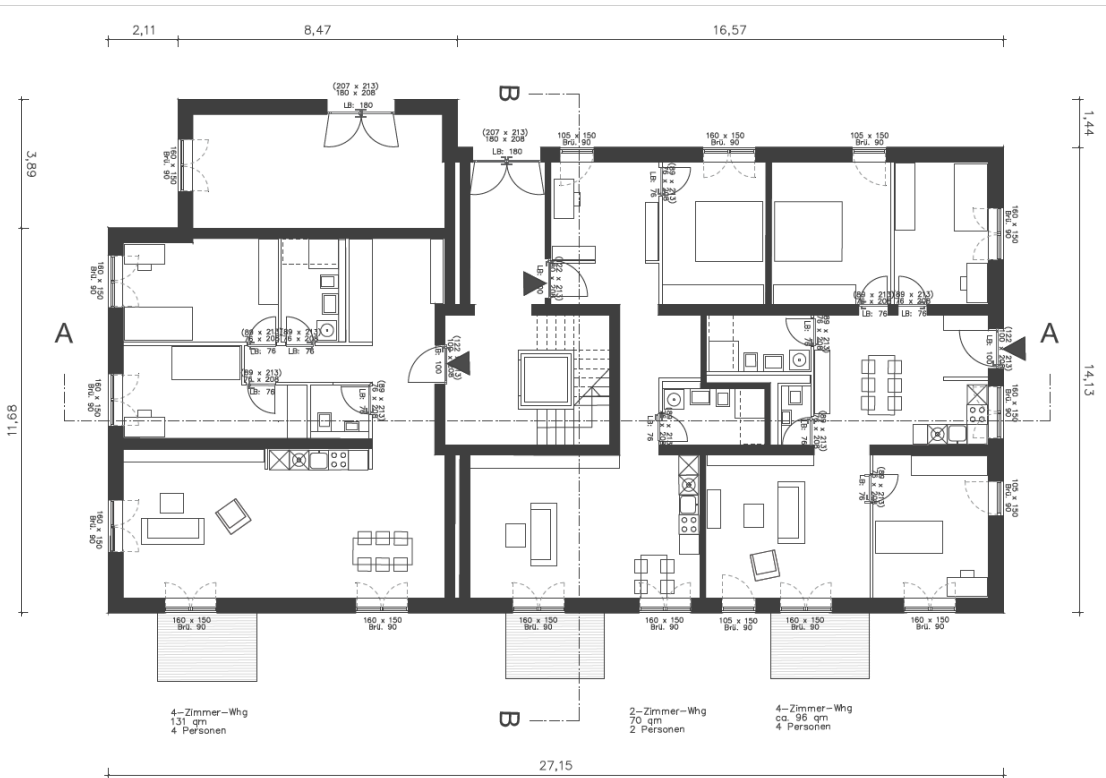


Abb. 4: Grundriss Erdgeschoss

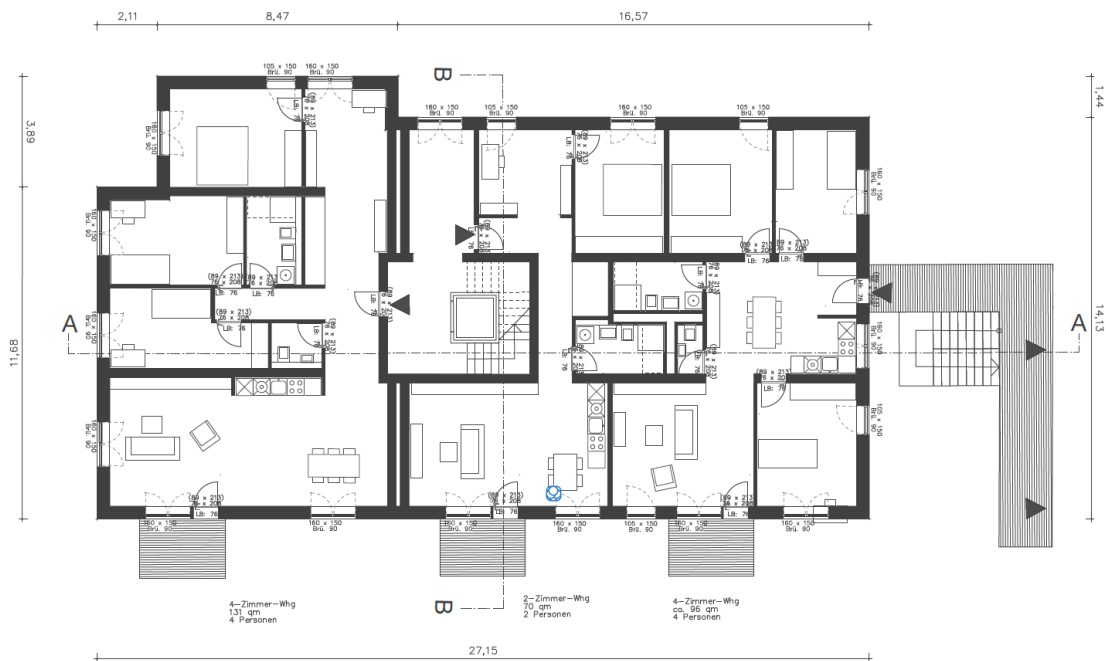


Abb. 5: Grundriss 1. Obergeschoss

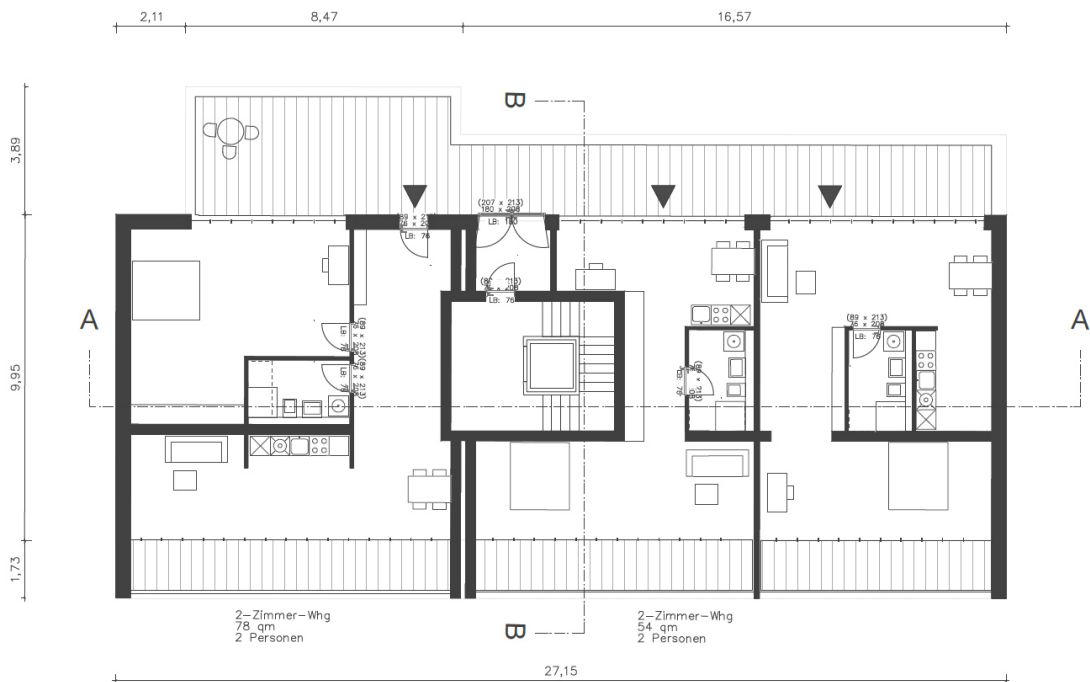


Abb. 6: Grundriss 2. Obergeschoss



Abb. 7: Schnitt A-A

In der Ausschreibung des DAVs zu der Baumaßnahme legt der Verein unter anderem „Wert auf eine ressourcenschonende und nachhaltige Bauweise“ (DAV, 2021, S. 6). Diese Anmerkung lässt Raum zur Interpretation, da sie keine Aussage darüber macht, inwiefern das künftige Gebäude diese Anforderungen einhalten soll und auch keine konkreten Zielvorgaben macht. In den beiden folgenden Kapiteln 5.1.2 und 5.1.3 werden zwei Sanierungsvarianten vorgestellt, die sich dieser Vorgabe annähern, indem einmal die betriebsbedingten Emissionen und einmal die grauen Emissionen optimiert werden.

5.1.2. Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Im Zuge des Klimaschutzgesetzes 2021 (KSG) wird von der Bundesregierung das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 angestrebt. Der Gebäudebestand soll im Einklang damit ebenso vollständig klimaneutral sein. Die Maßnahmen, welche zu diesem Ziel führen sollen, bestehen hauptsächlich aus Effizienzstrategien und dem Umbau des bestehenden Energieversorgungssystems auf erneuerbare Energien. (Thamling & Rau, 2022, S. 7–8, 14) Gebäude, die heute neu gebaut oder saniert werden, sollten aufgrund ihrer langen Lebensdauer bereits heute den gewünschten Energiestandard von 2045 erreichen. Andernfalls würde der Gebäudestandard ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr in Einklang mit dem Transformationspfad der Bundesregierung stehen und so eine erneute energetische Sanierung notwendig werden. (Carbon Risk Real Estate Monitor [CRREM], 2020)

Nun stellt sich die Frage, was genau der Begriff *Klimaneutralität* im Kontext des Gebäudes bedeutet. Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) liefert in ihrem *Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte* zwei Definitionen. Sie grenzt dabei *klimaneutral betriebene* von *klimaneutral erstellten* Gebäuden ab. (Braune et al., 2020, S. 37–38) Betrachtet man die Strategien, welche im Gebäudebereich zur Klimaneutralität führen sollen (Thamling & Rau, 2022), wird klar, dass in 2045 klimaneutral betriebene Gebäude angestrebt werden. Die DGNB definiert Klimaneutralität im Bilanzrahmen Betrieb wie folgt:

Ein Gebäude oder ein Standort wird klimaneutral betrieben, wenn auf ein Jahr gerechnet eine ausgeglichene CO₂-Bilanz nachgewiesen wird. Dabei werden die durch den Energieverbrauch verursachten Treibhausgasemissionen den Emissionen gegenübergestellt, die durch den Export von gebäudenah erzeugter erneuerbarer Energie vermieden wurden. Als durch Energieverbrauch verursachte Treibhausgasemissionen gelten direkte Emissionen am Standort (z.B. durch Verbrennung fossiler Brennstoffe) sowie alle durch die Bereitstellung der Energieträger außerhalb des Standorts verursachten Emissionen (z.B. Erzeugung von Strom oder Fernwärme, Gewinnung und Bereitstellung von Brennstoffen). (Braune et al., 2020, S. 37–38)

Diese Definition gilt für den Betrieb, der alle energiebedingten Emissionen erfasst, die grauen Emissionen des Gebäudes aber außer Acht lässt. Auf dieser Grundlage basiert

die erste Sanierungsvariante, die in dieser Arbeit untersucht wird. Diese wird im Folgenden als Variante *Klimaneutralität im Betrieb* (KNB-Variante) bezeichnet.

Der einfachste Weg, die Anforderung der Klimaneutralität zu erfüllen, ist die vollständige regenerative Eigenproduktion der im Gebäude benötigten Energie. Dafür wird angenommen, dass das Dach vollständig mit Photovoltaik (PV) belegt ist. Der Strom-Ertrag, welcher sich übers Jahr ergibt (vgl. Kapitel 5.2.2), stellt schlussendlich den maximalen Energiebedarf dar, den das Gebäude insgesamt verbrauchen darf. Zu dem Energiebedarf des Gebäudes zählen dabei nicht nur der Strombedarf für betriebsbedingte Prozesse wie Wärme, Warmwasser oder Hilfsenergie, sondern auch nutzerbedingte Prozesse. (Braune et al., 2020, S. 9) Um den betriebsbedingten Endenergiebedarf des klimaneutral betriebenen Gebäudes festzusetzen, wird folglich der Anwendungsstrombedarf vom Solarertrag subtrahiert. Mit der DIN V 18599 Software *SolarComputer*, welche ebendiesen betriebsbedingten Endenergiebedarf des Gebäudes berechnet, werden anschließend durch Iteration die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der verschiedenen Bauteile festgesetzt, sodass letztlich der vorgegebene Endenergiebedarf des Gebäudes (in kWh/m²a) erreicht wird. (Vgl. Kapitel 5.2.3) Anhand dieser zu erreichenden U-Werte werden die Dämmstärken der Bauteilaufbauten festgelegt. Der grundsätzliche Bauteilaufbau und die verwendeten Materialien ergeben sich in der KNB-Variante aus der gängigen Praxis, d. h. es werden je nach Anwendungsbereich häufig verwendete Materialien und Bauweisen abgebildet. (Vgl. Kapitel 5.2.4)

5.1.3. Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Im Kontrast zur Variante *Klimaneutralität im Betrieb*, welche die Betrachtung der grauen Emissionen vernachlässigt, legt die Variante *Klimafreundliche Konstruktion* (KFK-Variante) den Fokus auf die Minimierung der konstruktionsbedingten Treibhausgasemissionen. Dazu wird die Konstruktion der Bauteilaufbauten aus der KNB-Variante übernommen, die Baustoffe aber durch klimafreundlichere Varianten ausgetauscht und die Konstruktion so optimiert. Obwohl die Dämmstärken damit gleich bleiben, können sich die U-Werte der Bauteile durch die ggf. höheren Wärmeleitfähigkeiten verschlechtern. Der Endenergiebedarf des Gebäudes in der KFK-Variante ist damit im Vergleich zur KNB-Variante höher und es muss zusätzlich zum Strom aus der Photovoltaik-Anlage noch Energie aus dem Stromnetz bezogen werden. Auch wenn diese Variante also bezüglich der grauen Emissionen besser abschneidet, so entstehen während der Nutzungsphase zusätzliche Emissionen durch den CO₂-Ausstoß der Stromerzeugung.

Daraus ergibt sich die Schwierigkeit einer Definition, ab wann eine Konstruktion als *klimafreundlich* bezeichnet werden kann. Dazu stellt lediglich die DGNB einen Referenzwert für die konstruktionsbedingten Emissionen zur Verfügung. Andere Richtlinien zum nachhaltigen Bauen wie das Bewertungssystem nachhaltiges Bauen (BNB) oder das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) geben nur Grenzwerte an, in denen auch der Energieverbrauch während der Nutzungsphase inkludiert ist (Krinitzki, Kaczorowski & Hartz, 2023, S. 22–23; BMWSB, 2023). Die DGNB liefert dagegen sogar verschiedene Stufen an Grenzwerten für die konstruktionsbedingten Emissionen, bei deren Erreichung eine gewisse Punktzahl in ihrem Zertifizierungssystem erreicht wird. Die bestmögliche Leistung wird nach DGNB erbracht, wenn der Referenzwert von 9,4 kg CO₂-Äqv/m²a um 50 % unterschritten wird, d. h. die konstruktionsbedingten Emissionen des Gebäudes unter 4,7 kg CO₂-Äqv/m²a liegen. (DGNB GmbH, 2021, S. 57–58, 82-84) Die Materialwahl der Bauteilaufbauten in der KFK-Variante soll mit nachwachsenden und weniger CO₂-intensiven Baustoffen so weit wie möglich optimiert werden. Mindestens aber soll der oben angegebene Grenzwert unterschritten werden.

5.1.4. Rahmenparameter der Ökobilanzstudie

Für die Durchführung der statischen Ökobilanz wird die deutsche Datenbank Ökobaudat in der aktuellen Version 2021-II vom 25.06.2021 verwendet. Diese bildet eine einheitliche Datenbasis für die Lebenszyklusanalyse von Bauwerken und stellt Datensätze konform zur DIN EN 15804 zur Verfügung, wodurch eine hohe Qualität der Daten garantiert werden kann. (BMWSB, o. J.a) Genutzt werden die Datensätze nach DIN EN 15804+A1, da hier bisher im Vergleich zu EN 15804+A2 noch eine größere Anzahl an Datensätzen zur Verfügung steht und diese noch immer im Rahmen des BNB verbindlich sind. (BMWSB, o. J.b) Die Lebensdauer des Gebäudes bzw. der Betrachtungszeitraum der Studie wird standardmäßig mit 50 Jahren angesetzt (DIN EN 1990, S. 30; DGNB GmbH, 2021, S. 81). Die Lebensdauer hat einen starken Einfluss auf die Umweltwirkungen und ist somit ein sehr wichtiger Rahmenparameter. (Asdrubali et al., 2020, S. 3) Ob die Annahme für das Sanierungsvorhaben des DAVs gerechtfertigt ist, kann wegen des hohen Aufwands in der Studie allerdings nicht genauer untersucht werden. Die Lebensdauern der Baustoffe selbst werden je nach Anwendungsbereich vom BNB übernommen (BMWSB, 2017), die Lebensdauern der Technik-Komponenten sind in den Ökobaudat-Datensätzen meist direkt hinterlegt.

Die Zielgröße, welche in dieser Ökobilanz untersucht wird, ist CO₂ bzw. GWP. Die Umsetzung der DLCA kann aufgrund des hohen Aufwandes nur mit einem Wirkungsindikator durchgeführt werden. Das GWP wird gewählt, da der Fokus in den nationalen und internationalen politischen Zielen auf der Reduktion von Treibhausgasen liegt (Bundesregierung, 2022; BMWK, o. J.a) und es sich in der Ökobilanz somit als Leitindikator etabliert hat (Khouli, John & Zeumer, 2014, S. 15; DGNB GmbH, 2021, S. 86). Sollen diese Klimaziele eingehalten werden, müssen bauliche Maßnahmen am Gebäude auch in Bezug auf deren Zielgröße bewertet werden. In dieser Arbeit ist die Verwendung der Begrifflichkeit CO₂ gleichwertig mit allgemeinen Treibhausgasemissionen bzw. CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äqv.) zu verstehen.

Da der Referenzwert für die klimafreundliche Konstruktion aus dem Kriterienkatalog zur Gebäudesanierung entnommen wird und an dieser Stelle auch die Vorgehensweise und Rahmenparameter der ökobilanziellen Berechnung vorgeschrieben sind, werden einige Vorgaben daraus übernommen. Die DGNB lässt dazu einerseits das *vereinfachte* und andererseits das *vollständige Rechenverfahren* zu. Während das vereinfachte Verfahren einige Erleichterungen in der Berechnung einräumt, fordert das vollständige Verfahren die Erfassung aller Bauteile und Prozesse. Zweiteres würde hier einige Schwierigkeiten aufwerfen, da manche Bauteile in ihrer Masse nur schwer abschätzbar sind, wie z. B. Rohrleitungen oder Verschraubungen, und außerdem in der Ökobaudat keine Datensätze für zugehörige Prozesse hinterlegt sind. Die verwendeten Rahmenparameter sind also aus dem vereinfachten Verfahren übernommen. Bei Sanierungen liegen demnach nur die neu eingebauten Bauteile innerhalb der Systemgrenze. Herstellung, Erneuerungen und End of Life werden damit für Bestandsbauteile nicht berechnet. (DGNB GmbH, 2021, S. 63–70) Im Gebäude des DAVs bedeutet das konkret, dass die bestehenden Betonbauteile, wie tragende Wände, Decken, Bodenplatte und Fundamente nicht mit in die Berechnung miteinfließen. Dies bedingt folglich die Annahme, dass die Tragstruktur des Bestandsgebäudes intakt ist und somit weiterhin verwendet werden kann. Die in Abb. 8 markierten Lebenswegphasen werden in der LCA für die neu gebauten Bauteile betrachtet.

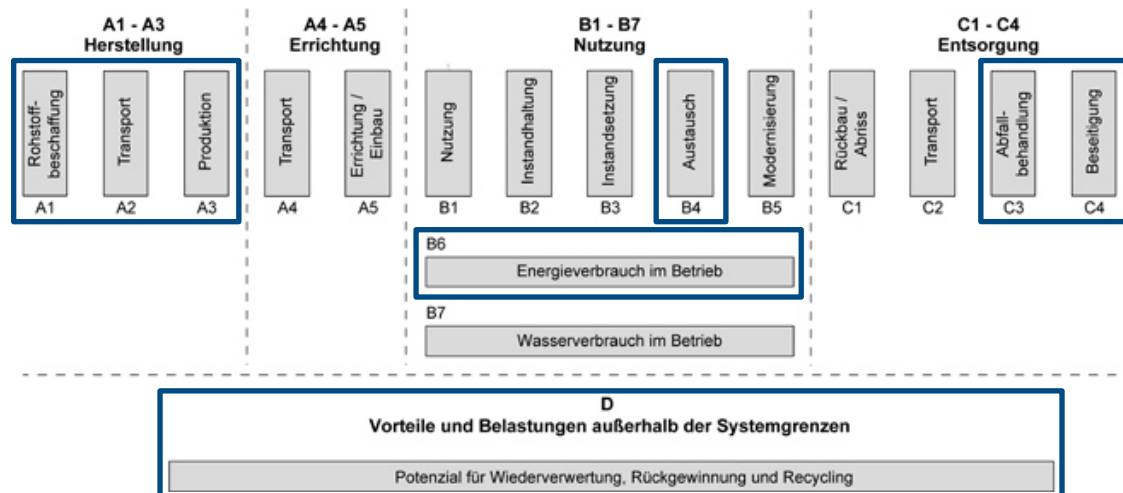


Abb. 8: Betrachtete Lebenswegphasen (Schneider-Marin, Harter & Vollmer, 2021)

Modul D wird dabei nur mit den anderen Lebenswegphasen verrechnet, wenn es um die Grenzwert-Einhaltung in der KFK-Variante geht. Hier entspricht die Verrechnung der Nachnutzungspotenziale den Vorgaben durch die DGNB. I. d. R. werden die Ergebnisse jedoch ohne Einbezug von Modul D angegeben. Die Quantifizierung von möglichen künftigen Vorteilen beruht auf ungesicherten Annahmen und so entsteht die Gefahr, die Ergebnisse möglicherweise durch deren Einbezug zu beschönigen. Modul D liegt außerdem nach DIN EN 15978 außerhalb der Bilanzgrenzen. (Schneider-Marin et al., 2021)

Als funktionelle Einheit dient die Nettoraumfläche des Gebäudes, welche sich auf ca. 1285 m² beläuft. Sowohl Wohnbereiche als auch Verkehrsflächen und Kellergeschoss sind darin inkludiert und notwendig, um eine einwandfreie Nutzung des Mehrfamilienhauses zu garantieren. Abschneidekriterien, welche die Nichtberücksichtigung von Prozessen oder Stoffströmen auch innerhalb der Systemgrenzen ermöglichen (Bacher et al., 2016, S. 14), werden nach dem vereinfachten Rechenverfahren der DGNB nicht angewandt. Die Ursache dafür könnte sein, dass ohnehin einige Vereinfachungen durch die Methodik vorgegeben sind und folglich nicht noch weitere Defizite in der Berechnung entstehen sollen. Auch die Anwendung eines Allokationsverfahrens wurde im Zuge dieser Studie nicht nötig bzw. erfolgt die Allokation der verwendeten Materialien und Energieflüsse zu Produkten in den verwendeten Datensätzen der Ökobaudat selbst.

Auch die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) wird nach dem vereinfachten Verfahren der DGNB bilanziert. In die LCA einbezogen werden somit Wärme- und Kälte-

erzeugungsanlagen, lufttechnische Anlagen, sowie Photovoltaikanlagen, jedoch keine Leitungen, Pumpen, Kanäle usw. Die restlichen Technikkomponenten werden über einen pauschalen Zuschlag von 20 % berücksichtigt. Bezugsgröße dazu sind die LCA-Ergebnisse, welche Konstruktion und TGA-Basiskomponenten von oben beinhalten. (DGNB GmbH, 2021, S. 71–72) Dieses Vorgehen weist gewisse Schwachpunkte auf: Erstens besteht Unsicherheit darüber, ob ein pauschaler Zuschlag auf alle Gebäudetypen gleichmäßig anwendbar ist und zweitens sind die Umweltwirkungen durch die TGA damit abhängig von der Konstruktion, was zweifelsohne Folgefehler verursacht. (Schneider-Marín et al., 2018, S. 88) So würde beispielsweise die TGA in der KFK-Variante deutlich geringere Umweltwirkungen aufweisen als in der KNB-Variante, obwohl exakt die gleichen Technikkomponenten verbaut sind. In dieser Arbeit wird der TGA-Aufschlag dementsprechend nur für die KNB-Variante berechnet, welche standardmäßige Aufbauten enthält. Die absoluten Ergebnisse der TGA werden anschließend für die KFK-Variante übernommen. So wird die Unterschätzung der Umweltwirkungen der TGA in der KFK-Variante im Vergleich zur KNB-Variante verhindert. Schneider-Marín et al. (2018, S. 88) verwenden den Ansatz der DGNB ebenso in ihrer Studie, berechnen zur Validierung des Pauschalwertes aber zusätzlich eine genaue Ökobilanzierung der TGA anhand eines Bürogebäudes. Hierbei kommen sie zum Schluss, dass der Aufschlag von 20 % für das untersuchte Gebäude zu gering angesetzt ist. Sie betonen aber auch, dass besonders Nichtwohngebäude einer umfangreichen technischen Ausrüstung bedürfen und die Ergebnisse von Wohngebäuden ggf. darunter liegen. Dies zeigt, dass in dem Bereich noch hoher Forschungsbedarf besteht und Tools zur Erleichterung der LCA im TGA-Bereich noch fehlen. Auch wenn gewisse Unsicherheiten durch den Ansatz der DGNB entstehen, soll die TGA dennoch nicht vom Untersuchungsrahmen ausgenommen werden. Ansonsten würde ohnehin eine Unterschätzung der gesamten Umweltwirkungen stattfinden und eine Einordnung in die politischen Ziele wäre nur wenig sinnvoll. Da eine genaue Bilanzierung der TGA außerdem sehr komplex und zeitaufwendig ist sowie ohne detaillierte Planungsunterlagen kaum umsetzbar (Schneider-Marín et al., 2018, S. 87), wird das vereinfachte Rechenverfahren der DGNB dennoch verwendet.

5.2. Sachbilanz aller Varianten

Im folgenden Kapitel werden alle Grundlagen, welche für die Berechnung der Ökobilanz notwendig sind, ermittelt. Diese gelten dann nicht nur für die statische, sondern auch für

die dynamische LCA und ermöglichen die Durchführung der Wirkungsabschätzung für sowohl graue als auch betriebsbedingte Emissionen für beide Sanierungsvarianten.

5.2.1. Flächenberechnung der Gebäudehülle und innenliegenden Bauteile

Zu Beginn der Sachbilanz werden die Flächen aller verschiedenen Bauteile berechnet. Für die in Kapitel 5.2.3 folgende Energiebedarfsberechnung sind vor allem die Gebäudehüllflächen und ihre Ausrichtung relevant. Folglich sind hierfür auch nur die Flächen ab Erdgeschoss aufwärts von Bedeutung, da das Kellergeschoss außerhalb der thermischen Hülle liegt und die Kellerdecke die Abgrenzung zum unbeheizten Raum darstellt. Als Grundlage für die DIN V 18599 ergeben sich aus den oben dargestellten Plänen (vgl. Abb. 4 bis Abb. 7) die in Anhang 2 Tab. A 2 aufgeführten Gebäudehüllflächen und Volumina. Eine Übersicht zu deren Flächenverteilung zeigt Abb. 9.

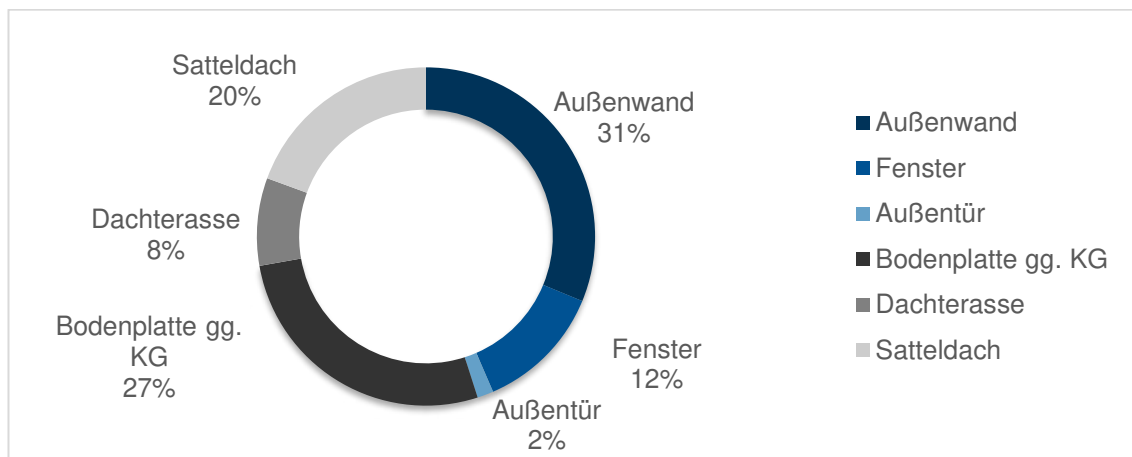


Abb. 9: Verteilung der Gebäudehüllflächen

Um schlussendlich auch die Massenbilanzierung auf dieser Flächenberechnung aufbauen zu können, werden hier bereits auch die Innenbauteile mit berechnet. Dabei findet eine Aufteilung nach Tragkonstruktion, Bekleidungen innen, außen oder unten sowie Beläge statt. Das Kellergeschoss ist dabei in der Bilanzierung integriert. Dies liegt zwar außerhalb der thermischen Hülle und hat folglich keinen Einfluss auf den Energiebedarf, wird aber dennoch mit saniert und hat dementsprechend Auswirkungen auf die ökobilanzielle Berechnung und ist in der funktionellen Einheit inkludiert. Es werden die Bestandspläne mit den Sanierungsplänen von *Schankula Architekten* abgeglichen, um bestehende Bauteile von neu gebauten Bauteilen zu unterscheiden, da wie oben beschrieben bestehende Bauteile nicht in die LCA miteinbezogen werden. Die Tragstruktur bleibt erhalten, die Bekleidungen und Beläge allerdings werden komplett

erneuert, um das Gebäude energetisch zu ertüchtigen. Die tragenden Innenwände bleiben folglich bestehen, während davon ausgegangen wird, dass alle nichttragenden Innenwände erneuert werden. Beim Abgleich der beiden Plansätze wird festgestellt, dass dennoch kleine Flächen von tragenden Innen- und Außenwänden neue Konstruktionen sein werden. Bei den Bodenbelägen wird unterschieden in Bodenaufbau von Wohn- und Verkehrsbereichen. Das Kellergeschoss wird dabei den Verkehrsbereichen zugezählt. Da sich die Grundrisse von Bestand und Sanierung im Kellergeschoss nicht unterscheiden, wird davon ausgegangen, dass hier an den Wänden lediglich ein neuer Anstrich vorgenommen wird, aber keine größeren Baumaßnahmen wie das Setzen neuer Wände. Da für die LCA nur die neu gebauten Bauteile relevant sind, werden auch nur diese in der folgenden Tab. 1 aufgeführt. Es ergeben sich die nachstehenden Flächen für die verschiedenen Bauteile:

Tab. 1: Bauteilflächen (auf ganze Zahlen gerundet) von Innen- und Außenbauteilen

Kosten- gruppe	Bauteil	Fläche in m²
330	Außenwände - Tragende Außenwand (Neubau) - Außenwandbekleidung außen - Außenwandbekleidung innen Außenfenster Außentüren	20 449 427 176 22
340	Tragende Innenwände - Tragende Innenwand (Neubau) - Innenwandbekleidungen tragender Innenwände (und aller Wände im KG) Wohnungstrennwände - Tragstruktur der Wohnungstrennwände - Innenwandbekleidung von Wohnungstrennwänden Nichttragende Innenwände - Tragstruktur nichttragender Innenwände - Innenwandbekleidung nichttragender Innenwände Innentüren	57 1709 121 239 365 724 114
350	Decken - Deckenbelag Wohnraum - Deckenbelag Verkehrsfläche (und Bodenbelag im KG) - Deckenbekleidungen Wohnraum - Deckenbekleidungen Kellerdecke Treppen - Treppenbelag	780 475 511 311 20
360	Dachterrasse - Dachbelag Dachterrasse Satteldach - Dachkonstruktion Satteldach - Dachbelag Satteldach - Dachbekleidung Satteldach	121 279 279 260

Insgesamt ergeben sich die in Tab. 2 angegebenen Grundflächen. Die aufsummierte Nettoraumfläche inkl. Kellergeschoss stellt damit die Bezugsfläche für die Ökobilanz dar.

Tab. 2: Grundflächen (gerundet auf ganze Zahlen)

Geschoss	Bruttogrundfläche in m²	Nettoraumfläche in m²
Kellergeschoss	481	419
Erdgeschoss	391	323
Obergeschoss 1	391	323
Obergeschoss 2	270	219
Summe exkl. KG	1052	865
Summe inkl. KG	1533	1285

5.2.2. Solarertragsberechnung

Die Variante *Klimaneutralität im Betrieb* basiert darauf, dass der am Gebäude anfallende Energiebedarf über ein Jahr vollkommen durch erneuerbare Energien gedeckt wird. Um also den Energiebedarf des KNB-Gebäudes zu ermitteln, muss zuerst eine Solarertragsberechnung durchgeführt werden. Der Solarertrag entspricht dann dem maximal erlaubten Energiebedarf des Gebäudes inkl. des Nutzerstroms. Zur Durchführung der PV-Ertragssimulation wird auf das Programm *Polysun* von *Vela Solaris* zurückgegriffen, womit der Solarertrag am Standort einfach abgeschätzt werden kann. Eingabedaten sind hierfür der Standort sowie Eigenschaften der Dachflächen (Abmessungen, Ausrichtung, Winkel, Firsthöhe, etc.). Genauere Informationen zu der Berechnung können aus Anhang 3 entnommen werden.

Mit den schlussendlich 132 PV-Modulen, welche eine Leistung von 46,2 kWp besitzen und eine Fläche von 215 m² abdecken, lassen sich abzüglich des Eigenverbrauchs der Anlage im Jahr 43.206 kWh Strom erzeugen. Um diesen Wert greifbar und vergleichbar zu machen, wird er wie der Energiebedarf des Gebäudes auch auf die energetische Gebäudenutzfläche bezogen. Diese ist auf dem Energieausweis ausgewiesen und i. d. R. etwas größer als die allgemeinen Wohnflächenangaben (Deutsche Energie-Agentur GmbH [dena], 2016). Für das Mehrfamilienhaus des DAVs beträgt sie 934 m², wodurch sich der PV-Ertrag auf ca. 46,3 kWh/m²a beläuft.

5.2.3. DIN 18599 Berechnung zur Bilanzierung des Betriebsenergiebedarfs

Für die Variante *Klimaneutralität im Betrieb* soll der oben genannte PV-Ertrag ausreichen, um Nutzerstrom und Betriebsstrom zu decken, damit das Gebäude letztendlich klimaneutral betrieben wird. Nach der ersten Berechnung der Ökobilanz beider Sanierungsvarianten wurde allerdings festgestellt, dass der Grenzwert für die KFK-Variante mit dieser Grundlage bei Weitem nicht eingehalten werden kann. Dies liegt vor allem an dem großen Anteil der grauen Emissionen der PV-Anlage, welche fast 60 % des DGNB-Grenzwertes ausmachen. Dies zeigt deutlich, dass besonders in der Herstellung von PV-Anlagen noch immer zu viele Treibhausgase emittiert werden und somit Handlungsbedarf zur Dekarbonisierung der Prozesse besteht. Ggf. sollten auch höhere Lebensdauern als 20 Jahre in Betracht gezogen werden, um die Austauschhäufigkeit zu verringern. Wollte man jedenfalls den gesetzten Grenzwert für klimafreundliche Konstruktionen einhalten, würden die TGA sowie die PV-Anlage zusammen bereits über 90 % der erlaubten Emissionen des Gebäudes ausmachen. Damit müsste die Baukonstruktion selbst unverhältnismäßig klimafreundlich gebaut werden, um diese Emissionen wieder auszugleichen. Da diese baukonstruktive Optimierung nur wenig sinnvoll erscheint, wird stattdessen der Ansatz gewählt, dass die PV-Anlage sich selbst energetisch amortisieren muss. Das eingesparte CO₂ während der Betriebsphase wird folglich mit dem emittierten CO₂ für Herstellung und Entsorgung verrechnet. Zusammenfassend bedeutet dies, dass der Solarertrag nun nicht mehr nur den Nutzer- und Betriebsstrombedarf decken muss, sondern zusätzlich auch die grauen Emissionen der PV-Anlage ausgleichen. Dadurch verringert sich der Energiebedarf, den das sanierte Gebäude besitzen darf bzw. muss der Energiestandard steigen. Dafür werden aber die grauen Emissionen der PV-Anlage nicht mehr in den Grenzwert der DGNB bzw. in die LCA eingerechnet.

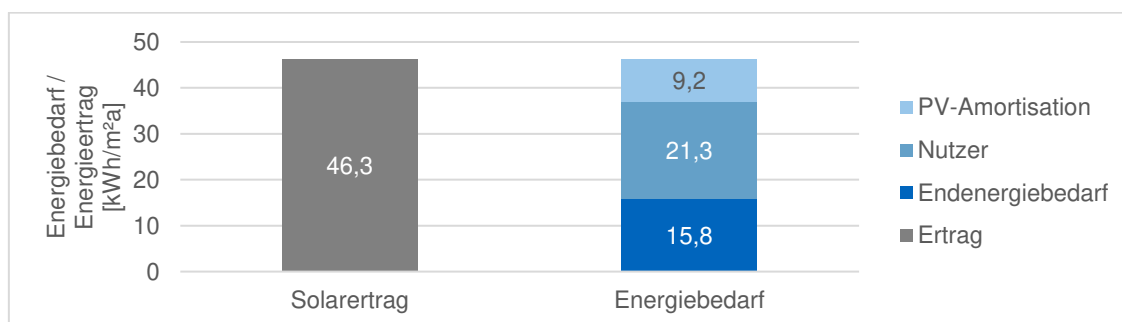


Abb. 10: Aufstellung der Energiebedarfe in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

In konkreten Zahlen ist diese Rechnung in Abb. 10 dargestellt. Für den Nutzerstrombedarf werden in der DIN V 18599 63 Wh/m²d als Richtwert pro Nettonraumfläche

angegeben (DIN V 18599-10, S. 17). Umgerechnet auf ein Jahr und bezogen auf die energetische Gebäudenutzfläche ergibt sich ein Anwendungsstrombedarf von 21,3 kWh/m²a. Außerdem ergibt sich über die Lebensdauer des Gebäudes von 50 Jahren für die Herstellung und Entsorgung der 215 m² PV-Fläche mit einem Austausch nach jeweils 20 Jahren ein GWP von ca. 176 t CO₂-Äqv. Geht man davon aus, dass je kWh Eigenstromerzeugung 410 g CO₂-Äqv. eingespart werden (Kiesel, 2022, S. 36), welche bei Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz anfallen würden, muss die Anlage ca. 429 MWh Strom erzeugen, um sich energetisch zu amortisieren. Umgerechnet auf energetische Gebäudenutzfläche und Lebensdauer des Gebäudes heißt dies, dass 9,2 kWh/m²a auf die Amortisation der PV-Anlage umzulegen sind. Nachdem also Energiebedarf für Nutzerstrom und PV-Amortisation von dem Solarertrag subtrahiert werden, beläuft sich der erlaubte Gebäudeendenergiebedarf auf 15,8 kWh/m²a.

Aus diesem maximalen Energiebedarf, den das sanierte Gebäude der KNB-Variante schließlich besitzen darf, ergeben sich die Anforderungen an die verschiedenen U-Werte der Bauteile. Da der Endenergiebedarf sowohl von einzelnen U-Werten als auch von den Flächenanteilen der jeweiligen Bauteile abhängig ist, muss eine iterative Annäherung an den gewünschten Endenergiewert stattfinden. Als Referenzwerte zum Start der Iteration werden dafür die Vorgaben des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle verwendet. In dessen Bundesförderung für energieeffiziente Gebäude (BEG) sind für die Einzelmaßnahmen (BEG EM) U-Werte vorgegeben, die dem Stand der Technik entsprechen. (BMWK, 2022b) (vgl. Tab. 3) Mit dieser Grundlage ergibt sich ein Endenergiebedarf von 17,6 kWh/m²a, welcher noch zu hoch ist. Somit müssen die U-Werte im nächsten Schritt vermindert werden. Beginnend mit dem Bauteil mit der größten Fläche werden die Wärmedurchgangskoeffizienten jeweils in 0,01-Schritten verbessert. Satteldach und Dachterrasse bleiben bei dieser Herangehensweise außen vor, da sie nach der BEG EM Anforderung bereits einen sehr niedrigen U-Wert von 0,14 W/m²K besitzen und dieser laut Passivhaus-Institut damit bereits ausreichend niedrig ist (Passivhaus Institut, 2015). Da der Anforderungswert von 15,8 kWh/m²a fast dem Passivhaus-Standard entspricht, werden zusätzlich Fenster und Türen an diesen Standard angepasst. Aus der Komponentendatenbank des Passivhausinstituts können je nach Materialität verschiedene zertifizierte Produkte herausgezogen werden. Der Großteil der in Deutschland verfügbaren Passivhausfenster unabhängig von der Materialität besitzt einen U-Wert von 0,8 W/m²K, was dem Maximalwert für transluzente Bauteile entspricht. (Passivhaus Institut, 2023b) Türen schneiden tendenziell mit niedrigeren U-Werten ab. (Passivhaus Institut, 2023a) Damit ergeben sich schlussendlich folgende

Anforderungen an die Gebäudehülle der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*, womit der Endenergiebedarf von 15,8 kWh/m²a erreicht werden kann:

Tab. 3: U-Wert Anforderungen an die Bauteile

Bauteil	Zu erreichender U-Wert nach BEG EM [W/m ² K] (BMWK, 2022b)	Zu erreichender U-Wert KNB-Variante [W/m ² K]
Kellerdecke	0,25	0,22
Außenwände	0,20	0,17
Satteldach	0,14	0,14
Dachterrasse	0,14	0,14
Fenster	0,95	0,80 (Passivhaus Institut, 2023b)
Türen	1,30	0,68 (für PVC-Rahmen-Einganstüren nach Passivhaus Institut, 2023a)

Für die Variante *Klimafreundliche Konstruktion* werden vom Prinzip her die gleichen Bauteilaufbauten wie in der KNB-Variante verwendet. Allerdings werden die Baustoffe durch nachwachsende Rohstoffe oder Alternativen mit möglichst geringem Treibhausgaspotenzial ersetzt, wenn der Verwendungsbereich dies zulässt. Da die nun verwendeten Baustoffe teilweise höhere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen können, ist es möglich, dass der U-Wert angehoben wird und somit die Emissionen während der Nutzungsphase steigen. Mit den Bauteilaufbauten aus Kapitel 5.2.4 ergibt sich schließlich ein Endenergiebedarf von 19,5 kWh/m²a für die Variante *Klimafreundliche Konstruktion*. Detaillierte Unterlagen zu den Ergebnissen aus *SolarComputer* sind in Anhang 4 abgelegt.

5.2.4. Festlegung der Bauteilaufbauten für alle Varianten - Bauteilkatalog

Im Folgenden werden die Schichtaufbauten je nach U-Wert-Anforderungen an das Bauteil festgelegt. In der Variante *Klimaneutralität im Betrieb* werden in erster Linie Baustoffe und Materialien ausgewählt, welche für den benötigten Anwendungsbereich in der Praxis häufig zur Verwendung kommen. Dies wird anhand von Eignung der Baustoffe für die gewünschte Anwendung und ihrem Marktanteil abgewogen. Zusätzlich erfolgt die Eingrenzung der Baustoffwahl durch das Vorhandensein von passenden Ökobaudat Datensätzen, damit mit den gewählten Aufbauten eine vergleichbare

Ökobilanzstudie umzusetzen ist. Hierbei wird darauf geachtet, dass generische oder repräsentative Datensätze verwendet werden. Falls gewisse Baustoffe beispielsweise einen sehr hohen Marktanteil besitzen, aber kein passender Datensatz vorliegt, wird folglich ein anderer Baustoff ausgewählt, bei dem die gewünschte Datenbasis vorhanden ist. Nur falls keine Alternativen zur Verfügung stehen, wird auf einen durchschnittlichen Datensatz zurückgegriffen, welcher verbandsspezifische Werte liefert (BMWSB, o. J.a).

Die U-Werte werden mittels des U-Wert-Rechners von *Ubakus* berechnet. Die Abbildungen in diesem Kapitel stammen ebenfalls aus dem Programm. Dort sind zahlreiche Baustoffe mit den zugehörigen Eigenschaften, wie zum Beispiel Wärmeleitfähigkeit oder gängige Schichtdicke hinterlegt. Mit diesen Standardwerten von *Ubakus* wird gerechnet, falls keine genaueren Informationen und Vorgaben zu den verwendeten Baustoffen vorhanden sind. Da bzgl. der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen in den Ökobaudat-Datensätzen kein Wert hinterlegt ist und dieser Parameter aber sehr hohen Einfluss auf den U-Wert hat, wird hier, um ebenfalls gängig verwendete Materialien abzubilden, für die Dämmstoffe eine mittlere Wärmeleitfähigkeit des Materials angenommen. Die Dämmstoffdicke wird in *Ubakus* in 2 cm Schritten variiert. Dies hat den Grund, dass die für die Berechnung verwendeten Dämmstoffplatten oder -matten auch am freien Markt in der vorgegebenen Dicke erhältlich sein sollen. Die finale Dämmstoffdicke ergibt sich schlussendlich aus dem U-Wert, der maximal erreicht werden soll.

Es wird angenommen, dass die Tragkonstruktion bestehen bleibt und alle anderen Schichten erneuert werden. Die genauen Bestandsaufbauten des Gebäudes sind nicht bekannt und werden daher anhand von sichtbaren Anzeichen bei der Begehung und dem Baualter des Gebäudes geschätzt. Die Tragstruktur besteht demnach aus Stahlbeton. Die Aufbauten, welche tatsächlich in der Sanierungsmaßnahme umgesetzt werden sollen, befinden sich noch in Planung und können daher ebenfalls nur abgeschätzt werden. Für die wenigen Neubaukonstruktionen der tragenden Außen- und Innenwände (vgl. Kapitel 5.2.1) wird analog zur Bestandsstruktur Stahlbeton angenommen. In den folgenden Absätzen sind die jeweiligen Aufbauten für Bestand und die beiden Sanierungsvarianten beschrieben. Außerdem ist jeder verwendete Baustoff noch einmal zusätzlich tabellarisch aufbereitet mit Angabe des konkret verwendeten Datensatzes und Datensatztyps im Anhang 5 zu finden. Hier sind zusätzlich Quellenangaben, welche bei der Entscheidungsfindung halfen, hinterlegt. Die U-Wert-Berechnungen mit *Ubakus* sind in Anhang 6 abgelegt.

Außenwand im Bestand

Aus den Bestandsplänen kann keine einheitliche Wandstärke herausgenommen werden, da die eingezeichneten Außenwände verschiedenste Stärken aufweisen. Da die Tragstruktur ohnehin erhalten bleibt, ist dies für die LCA-Ergebnisse nicht relevant. Es wird die geringste Wandstärke von 30 cm dickem Stahlbeton als Grundstruktur für alle Außenwände angenommen. In der Begehung konnte erkannt werden, dass die Wände verputzt und gestrichen sind. Rechnerisch ergibt sich daraus ein aktueller U-Wert von ca. 3,04 W/m²K.

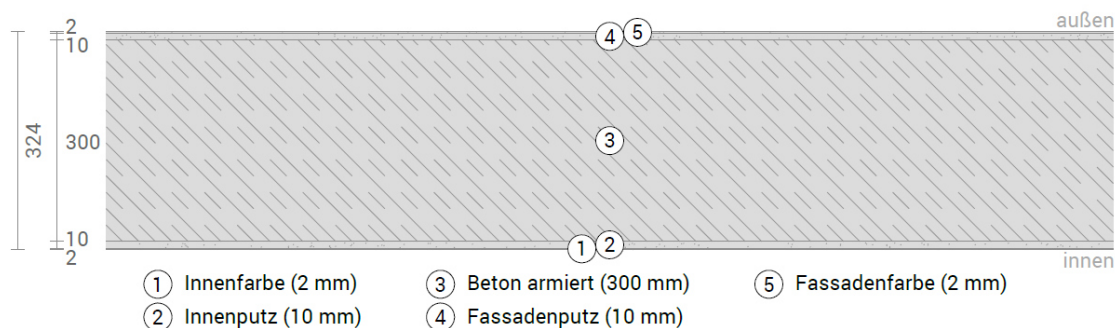


Abb. 11: Abgeschätzter Bauteilaufbau der Bestandsaußenwand

Außenwand in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Beginnend mit der Innenbekleidung der Außenwände wird als Innenputz der häufig verwendete und feuchteregulierende Kalkputz und als Innenfarbe die weit verbreitete Dispersionsfarbe gewählt. Als Außenwandbeschichtung kommt bei Sanierungsvorhaben mit nachträglicher Dämmung der Außenwand häufig ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) zum Einsatz (BauNetz, o. J.a). Bei der Auswahl eines geeigneten Dämmstoffes fällt die Entscheidung auf Mineralwolle, da kein geeigneter EPS-Datensatz in der Ökobaudat hinterlegt ist. Die Wärmeleitfähigkeit der Mineralwolle wird mit 0,040 W/mK festgelegt, da dies genau im Mittelbereich der sonst üblichen Leitfähigkeiten dieses Baustoffes (0,030 bis 0,050 W/mK) liegt. (BauNetz, o. J.h) Die Schichtdicke wird wie oben beschrieben anhand der Anforderung an den U-Wert mit 22 cm festgelegt. Als Außenputz für das WDVS-System wird ein Kunstharzputz verwendet. Die Fassadenfarbe wird so wie die Innenfarbe aufgrund des hohen Marktanteils als Dispersionsfarbe festgelegt. (Zwiener & Figl, 2018, S. 172) Insgesamt ergibt sich daraus folgender Bauteilaufbau, welcher einen U-Wert von 0,17 W/m²K erreicht:

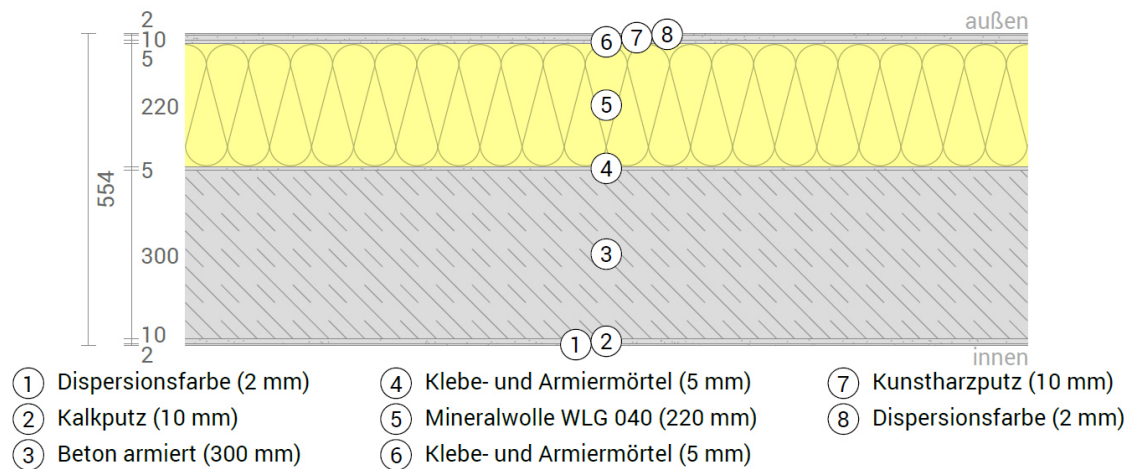


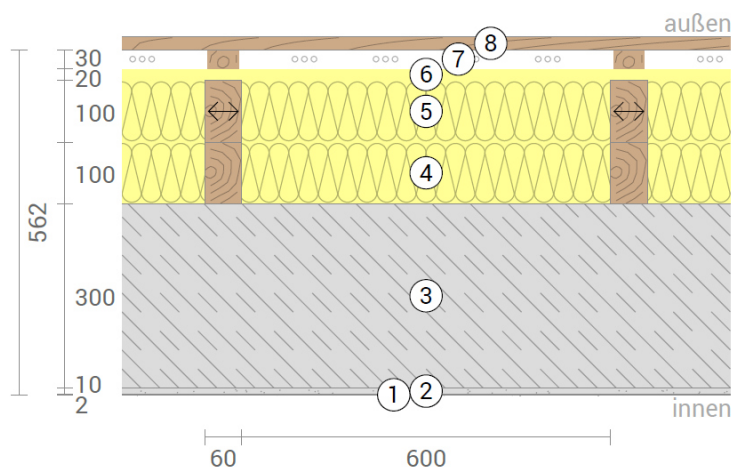
Abb. 12: Bauteilaufbau der Außenwand (KNB-Variante)

Außenwand in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Die Innenbekleidung aus Kalkputz und Dispersionsfarbe wird ersetzt durch Lehmputz und Kalkfarbe. Lehmputz besitzt gute feuchteregulierende Eigenschaften und sorgt für ein gesundes Raumklima. Außerdem treten bei der Entsorgung keine Schwierigkeiten auf. Da er wasserempfindlich ist, wird er hauptsächlich im Innenbereich verwendet. (Zwiener & Figl, 2018, S. 364–365) Als ideale Ergänzung für den Putz wäre eine Lehmfarbe sicherlich die passende Beschichtung, da aber in der Ökobaudat kein Datensatz vorhanden ist, wird auf eine Naturfarbe aus Kalk zurückgegriffen.

Zum festgelegten Vorgehen zur Erstellung der klimafreundlichen Aufbauten bildet die Außenwand gleich zu Beginn eine Ausnahme. Da ein WDVS aus einer Vielzahl inhomogener Schichten besteht und im EoL-Stadium quasi nicht trennbar und somit kaum recyclebar ist, ist es aus ökologischer Sicht damit unabhängig von der Baustoffwahl nicht zu empfehlen (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen & Seggewies, 2018, S. 109). Daher wird hierfür (obwohl es ggf. rechnerisch sowohl beim U-Wert als auch in der LCA kaum einen Unterschied macht) eine andere Konstruktion gewählt. In der Außenwandkonstruktion wird stattdessen eine vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) gewählt. Sie ist zwar bautechnisch aufwändiger, aber bauphysikalisch günstig. (BauNetz, o. J.) Für die Studie wird eine Holzständerkonstruktion mit Holzfaserdämmstoff im Gefach gewählt. Die Dämmung wird mit der mittleren Wärmeleitfähigkeit von 0,44 W/mK angenommen. (BauNetz, o. J.) Die Bayerische Bauordnung stellt nach Art. 26 Absatz 1 und 5 außer der Anforderung, dass „Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen [...] so auszubilden [sind], dass eine Brandausbreitung auf und in diesen

Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist“, keine weiteren Anforderungen an die Baustoffwahl der Dämmung oder Unterkonstruktion in Gebäudeklasse 3, womit eine Holzfaserdämmung in diesem Anwendungsbereich einsetzbar ist. Da die Unterkonstruktion selbst eine wärmetechnische Schwachstelle darstellt, zumal sie direkt mit dem Tragwerk verbunden ist, wird eine zweite Dämmschicht mit 90° gedrehter Unterkonstruktion angebracht. (BauNetz, o. J.) Danach folgen eine Unterdeckplatte, welche die wasserabweisende und diffusionsoffene Schicht zum Schutz der Dämmung darstellt, sowie die Hinterlüftung. Die totale Dämmstärke bleibt aber inkl. der Unterdeckplatte im Vergleich zur KNB-Variante gleich. Als Außenhaut und Wetterschutzschicht wird der nachwachsende Rohstoff Holz gewählt. Es ergibt sich damit der folgende Aufbau mit einem U-Wert von 0,21 W/m²K:



- | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------|
| ① Kalkfarbe (2 mm) | ④ Holzfaserdämmstoff (100 mm) | ⑦ Hinterlüftung |
| ② Lehmputz (10 mm) | ⑤ Holzfaserdämmstoff (100 mm) | ⑧ Vorhangfassade |
| ③ Beton armiert (300 mm) | ⑥ Unterdeckplatte Holzfaser (20 mm) | |

<-> Mit Pfeilen markierte (Balken-)Lagen verlaufen rechtwinklig zur Hauptachse.

Abb. 13: Bauteilaufbau der Außenwand (KFK-Variante)

Innenwand allgemein

Die Innenwände werden in drei verschiedene Typen unterteilt: tragende Innenwände, Wohnungstrennwände und nichttragende Innenwände. Die Dicken der drei Typen gehen aus den Sanierungsplänen von *Schankula Architekten* hervor: 30 cm tragende Wand, 16 cm Wohnungstrennwand und 10 cm nichttragende Wand. Da dies aber nur ein erster Entwurf ist, werden die Dicken lediglich als ungefähre Vorgabe gesehen, an welcher sich die Aufbauten orientieren sollen.

Innenwand im Bestand

Die tragenden Wände aus Stahlbeton sind im Bestand bereits vorhanden. Die Innenwandstärken variieren laut der Bestandspläne. Als Grundlage für den Bauteilaufbau der Sanierungsvarianten wird von einer Betonstärke von 26 cm ausgegangen. Wie bei der Bestandsaußenwand schon beschrieben, hat diese Annahme aber keinerlei Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse. Die tragenden Innenwände sind ebenso wie die Außenwände mit Putz und Farbe bekleidet.

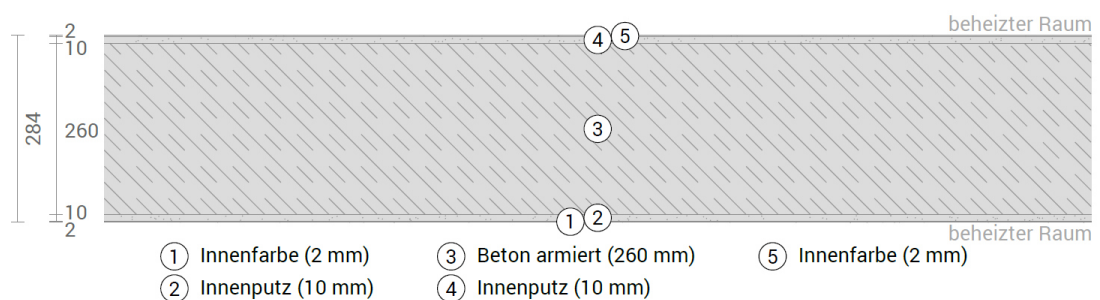


Abb. 14: Abgeschätzter Bauteilaufbau der tragenden Bestandsinnenwand

Aus welchen Materialien die nichttragenden Wände im Bestand bestehen, ist aus dem Plan nicht ersichtlich und konnte auch bei der Begehung nicht herausgefunden werden. Da diese aber ohnehin nicht erhalten bleiben, ist ihr Aufbau nicht relevant.

Innenwand in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Die Tragstruktur des Gebäudes bleibt erhalten, weshalb lediglich die Beschichtung erneuert werden soll. Wie bei der Außenwandbekleidung innen wird die Innenwandkleidung mit Kalkputz und Dispersionsfarbe ausgeführt.

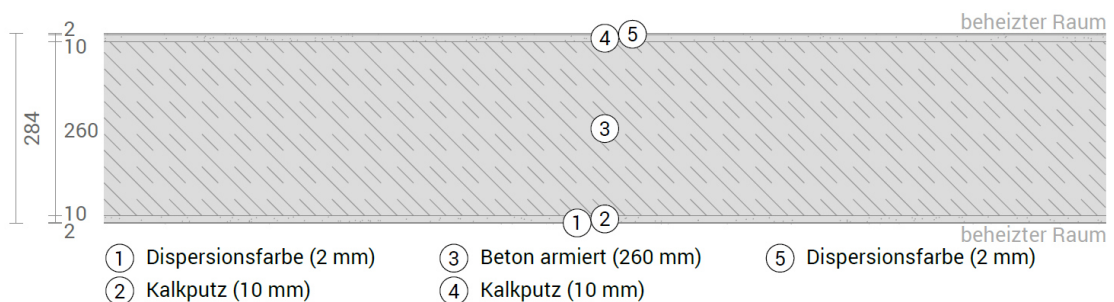


Abb. 15: Bauteilaufbau der tragenden Innenwand (KNB-Variante)

Für die Wohnungstrennwände und die nichttragenden Innenwände wird eine Trockenbaukonstruktion angenommen. Die Unterkonstruktion besteht aus Metallprofilen, ausgefacht mit Mineralwolle, welche gute Brandschutz- und Schalldämmeigenschaften besitzt. Beplankt wird die Konstruktion mit Gipsfaserplatten. Für den konstruktiven Aufbau wird eine Wohnungstrennwand von Knauf als Vorlage verwendet (Knauf Gesellschaft m. b. H., 2021). Damit ergibt sich folgender Bauteilaufbau:

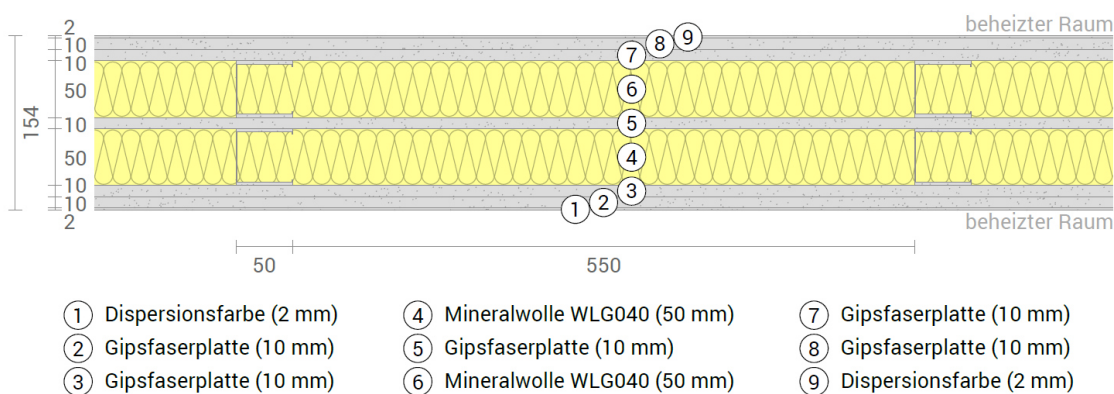


Abb. 16: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand (KNB-Variante)

Für die nichttragenden Innenwände wurde eine ähnliche, aber schlankere Trockenbaukonstruktion angenommen. Der Aufbau ergibt sich wie folgt:

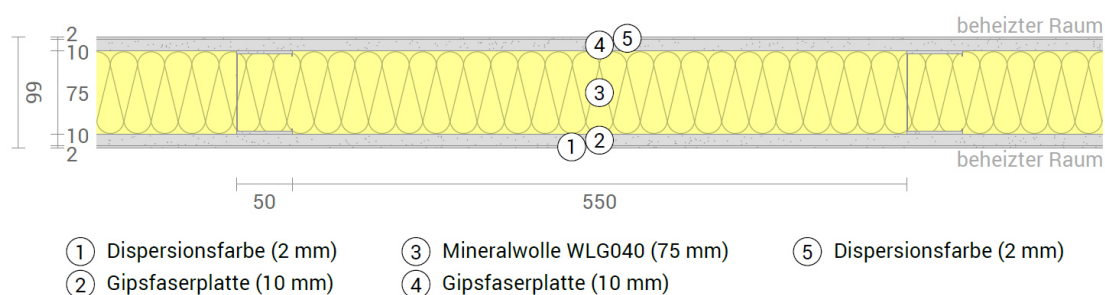


Abb. 17: Bauteilaufbau der nichttragenden Innenwand (KNB-Variante)

Innenwand in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Bei den tragenden Innenwänden wird wie oben beschrieben nur die Beschichtung erneuert. Analog zur Außenwand-Innenbeschichtung kommen Lehmputz und Kalkfarbe zum Einsatz.

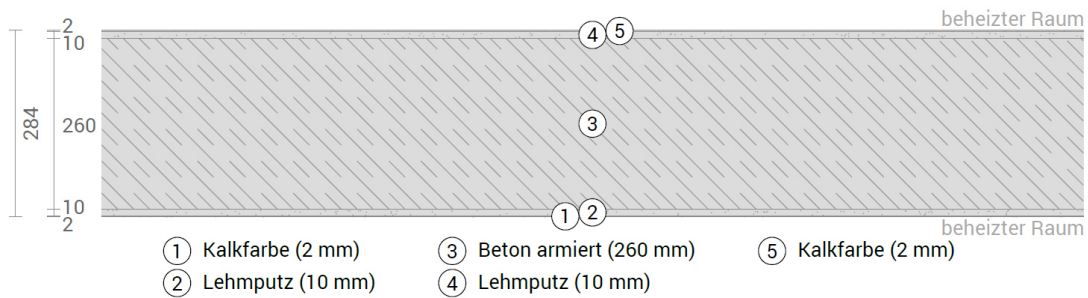


Abb. 18: Bauteilaufbau der tragenden Innenwand (KFK-Variante)

Für die Wohnungstrennwände wird prinzipiell der Aufbau der KNB-Variante als Vorlage genommen, aber die Metallständer durch eine Holzständerkonstruktion ersetzt sowie die Mineralwolle durch Holzfaserdämmung. Auch hier kann anstatt des Trockenputzsystems Gipsfaserplatte der Baustoff Lehm zum Einsatz kommen. Eine Lehmplatte kann ebenso zur Beplankung von Trockenbaukonstruktionen verwendet werden und besitzt außerdem gute Akustikeigenschaften. Auch brandschutztechnisch erreichen manche Produkte je nach Verarbeitung die Brandschutzklasse A1 (nicht brennbar) und können somit bei doppelter Beplankung sogar eine Feuerwiderstandsdauer von F 120 besitzen. (Hart Keramik AG, 2018) In Gebäudeklasse 3 müssen nach BayBo Art. 25 und 27 Trennwände lediglich feuerhemmend ausgeführt sein, was einem Feuerwiderstand von F 30 entspricht (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr [StMB], 2022, S. 183). Damit können die Lehmplatten im gewünschten Einsatzbereich einer Wohnungstrennwand die nötigen Funktionen erfüllen. Als Beschichtung wird erneut Kalkfarbe verwendet. Wegen der größeren Stärken der Lehmbauplatten im Vergleich zu den Gipsfaserplatten ergibt sich eine etwas dickere Wohnungstrennwand.

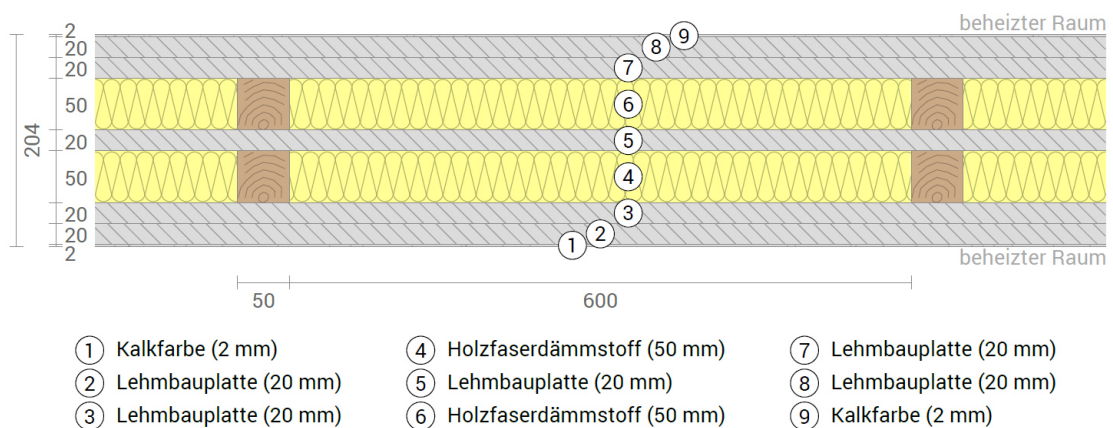


Abb. 19: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand (KFK-Variante)

Für die nichttragenden Innenwände wurde analog zu den Wohnungstrennwänden dieselben Baustoffe verwendet und ein schlanker Aufbau gewählt.

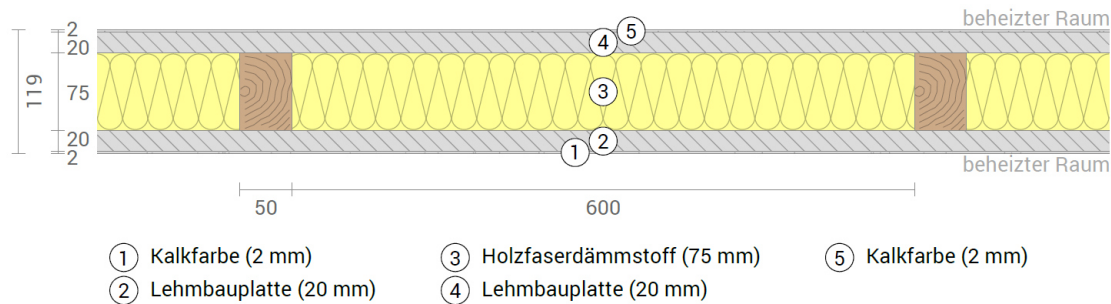


Abb. 20: Bauteilaufbau der nichttragenden Innenwand (KFK-Variante)

Kellerdecke im Bestand

Aus den Sanierungsplänen kann eine Deckenstärke von 22 cm herausgelesen werden. Die Tragstruktur besteht aus Stahlbeton. Der genaue Aufbau der Bestandsdecke ist nicht bekannt. Bei der Begehung konnte erkannt werden, dass der verwendete Fußbodenbelag in den belegten Bereichen meist ein Teppichboden ist, sowie die Kellerdecke unterseitig nicht gedämmt ist. Der Aufbau wird anhand des typischen Aufbaus von Kellerdecken von Gebäuden der 1970er Jahre vom Passivhaus-Bauteilkatalog für Sanierung abgeschätzt (Zelger, Figl, Scharnhorst, Lipp & Waltjen, 2017, S. 148). Nach diesem Vorbild ergibt sich folgender Bestandsaufbau mit einem U-Wert von $U = 0,87 \text{ W/m}^2\text{K}$:

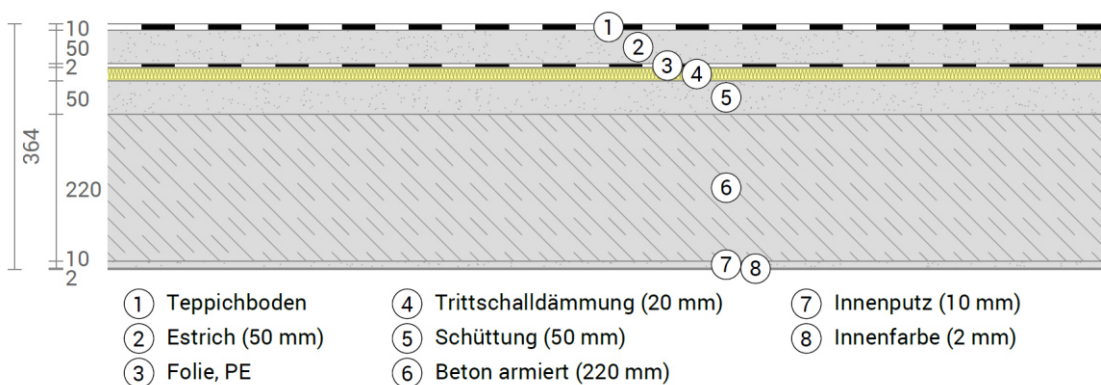


Abb. 21: Abgeschätzter Bauteilaufbau der Bestandskellerdecke

Kellerdecke in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Um den Wärmeschutz der Kellerdecke zu ertüchtigen, schlägt der Passivhaus-Bauteilkatalog ein unterseitiges WDVS vor (Zelger et al., 2017, S. 154). Der Aufbau sowie die Baustoffauswahl des WDVS wird von der Außenwand übernommen. Die Dämmstoffdicke von 100 mm ergibt sich aus der Anforderung für den U-Wert ($U_{KN} = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$). Für die Sanierung des Bodenbelages wird derselbe Aufbau wie bei der Bestandssituation angenommen: Schüttung, Trittschalldämmung, Trennfolie, Estrich, Bodenbelag. Da die Wärmeversorgung über eine Wärmepumpe stattfinden soll, wird außerdem davon ausgegangen, dass ein Niedertemperatursystem bzw. eine Flächenheizung im Estrich installiert wird. Für die Ausgleichsschüttung fällt die Entscheidung aufgrund der mangelnden Datensatzvielfalt auf eine zementgebundene Schüttung aus EPS-Partikeln. Zum Trittschallschutz wird eine mineralische Dämmung verwendet, die Trennlage darüber wird aus Polyethylen (PE) angesetzt. Da Zementestrich der meist eingesetzte Estrich ist und auch als Heizestrich geeignet ist (BauNetz, o. J.c), fällt die Wahl hierauf. Darauf wird ein PVC-Fußbodenbelag angebracht. Zusammenfassend ergibt sich folgender Bauteilaufbau mit einem U-Wert von $U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$:

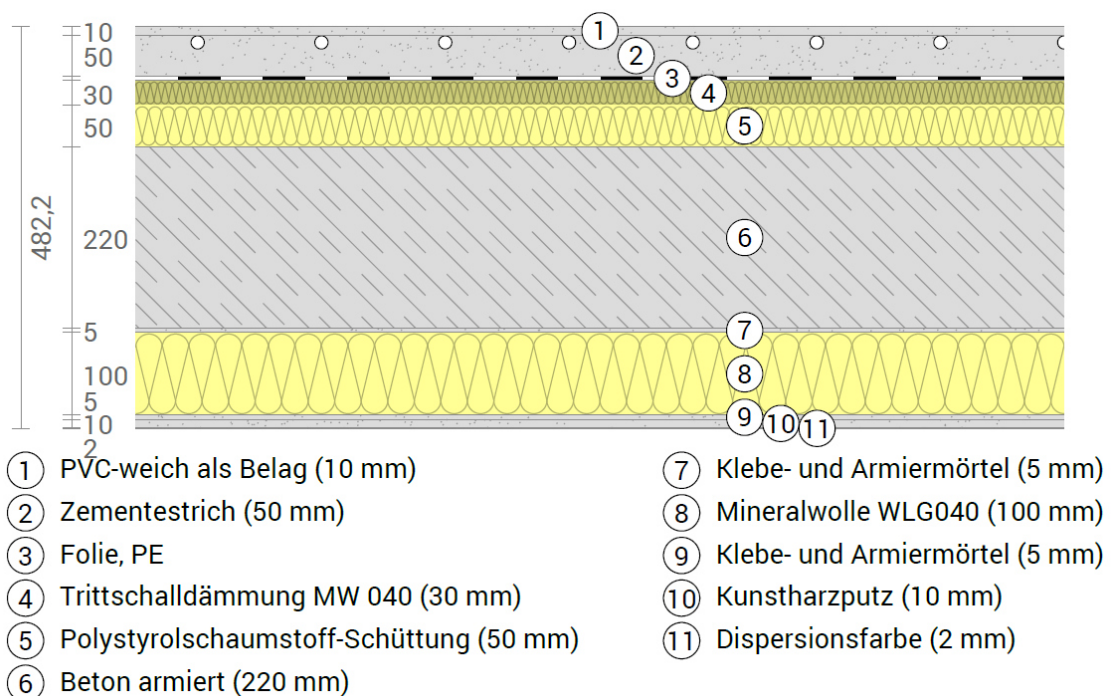
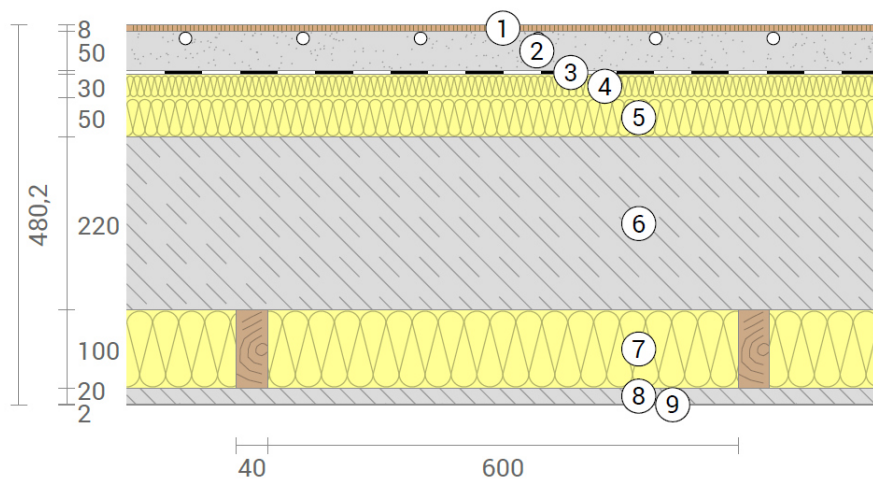


Abb. 22: Bauteilaufbau der Kellerdecke im Wohnbereich (KNB-Variante)

Kellerdecke in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Wie auch bei der Außenwand soll zur unterseitigen Ertüchtigung der Kellerdecke kein WDVS zum Einsatz kommen wegen seines schlechten EoL-Verhaltens. Folglich muss auf eine abgehängte Konstruktion zurückgegriffen werden. Die Unterkonstruktion besteht wie bei der Außenwand aus Holz, die Gefachdämmung wird mit Holzfaserdämmstoff ausgeführt. Beplankt wird die Unterkonstruktion mit einer Lehmbauplatte mit Kalkfarbe als Beschichtung. Bezüglich des Deckenbelags bleibt die zementgebundene EPS-Schüttung wegen mangelnder Alternativen an Datensätzen in Bezug auf Schüttungen bestehen. Darüber wird zum Trittschallschutz Holzfaserdämmstoff verwendet. Als ökologischere Alternative für die PE-Trennlage kann Kraftpapier dienen (Khouli et al., 2014, S. 89). Über der Trennlage wird statt des Zementestrichs, dessen Herstellung durch den gebundenen Zement vergleichsweise CO₂-intensiv ist, ein Calciumsulfatestrich verwendet. Für den Bodenbelag fällt die Entscheidung auf den nachwachsenden Rohstoff Holz. Im Vergleich zu Kork schneidet er besonders bezüglich der Langlebigkeit sehr gut ab (BMWSB, 2017). Es ergibt sich der folgende Gesamtaufbau mit einem U-Wert von 0,23 W/m²K.



- | | |
|---|-------------------------------|
| ① Massivholzparkett (8 mm) | ⑥ Beton armiert (220 mm) |
| ② Calciumsulfat Heizestrich (50 mm) | ⑦ Holzfaserdämmstoff (100 mm) |
| ③ Kraftpapier | ⑧ Lehmbauplatte (20 mm) |
| ④ Trittschalldämmung Holzfaserdämmstoff (30 mm) | ⑨ Kalkfarbe (2 mm) |
| ⑤ Polystyrolschaumstoff-Schüttung (50 mm) | |

Abb. 23: Bauteilaufbau der Kellerdecke im Wohnbereich (KFK-Variante)

Geschossdecke im Bestand

Der Aufbau der Decken ist nicht bekannt und wurde daher ebenso wie der Bestandsaufbau der Kellerdecke angenommen.

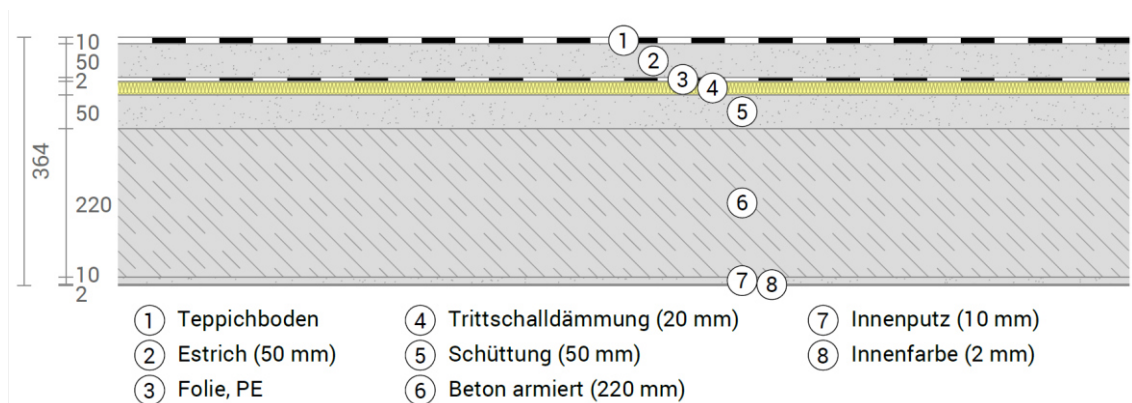


Abb. 24: Abgeschätzter Bauteilaufbau der Bestandsgeschossdecke

Geschossdecke in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Der Deckenbelag wird von der KNB-Variante der Kellerdecke übernommen, die Deckenbekleidung wird wie bei tragenden Innenwänden bzw. bei der Außenwandbekleidung innen ausgeführt. Daraus ergibt sich folgender Aufbau:

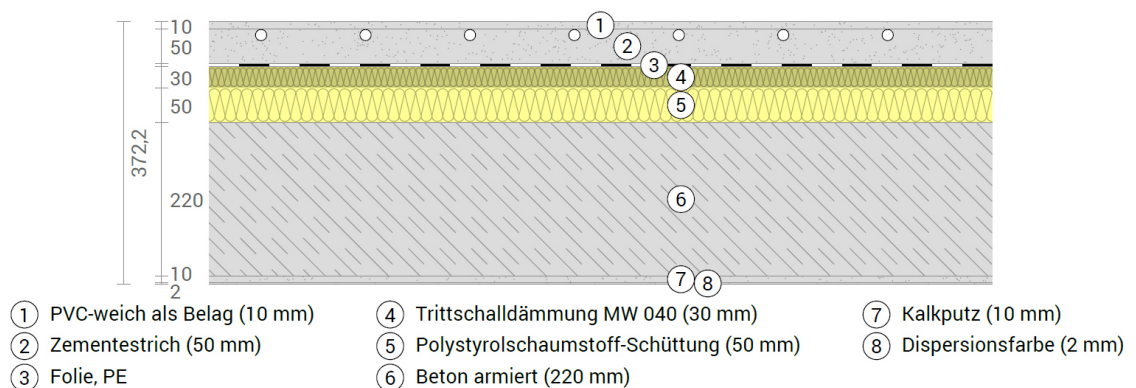


Abb. 25: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Wohnbereich (KNB-Variante)

Geschossdecke in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Für die Decke in der KFK-Variante wird der Deckenbelag der zugehörigen Kellerdecke gewählt und die Deckenbekleidung analog zur Innenbeschichtung von Außenwänden.

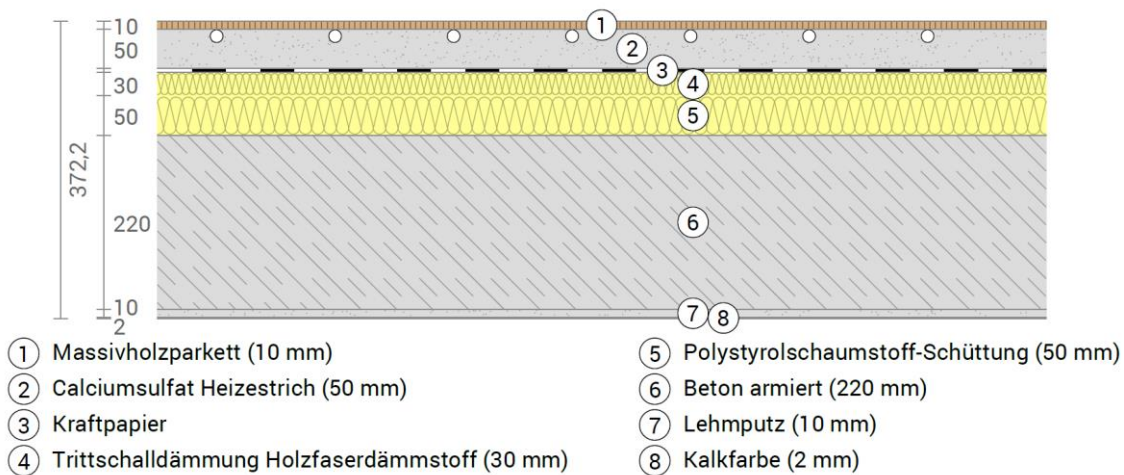


Abb. 26: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Wohnbereich (KFK-Variante)

Deckenbelag in der Verkehrsfläche

Eingangsbereiche und Treppenhäuser werden mit einem strapazierfähigeren Bodenbelag als in den Wohnbereichen ausgeführt sein und nur indirekt mitbeheizt. Die jeweiligen Deckenbeläge beider Varianten werden somit ohne Fußbodenheizung in der Estrichschicht ausgeführt und der Fußboden wird mit Fliesen belegt statt mit PVC oder Massivholzparkett. Auf den Treppenstufen selbst werden die Fliesen direkt mit Fliesenkleber auf die Betonstufen angebracht.

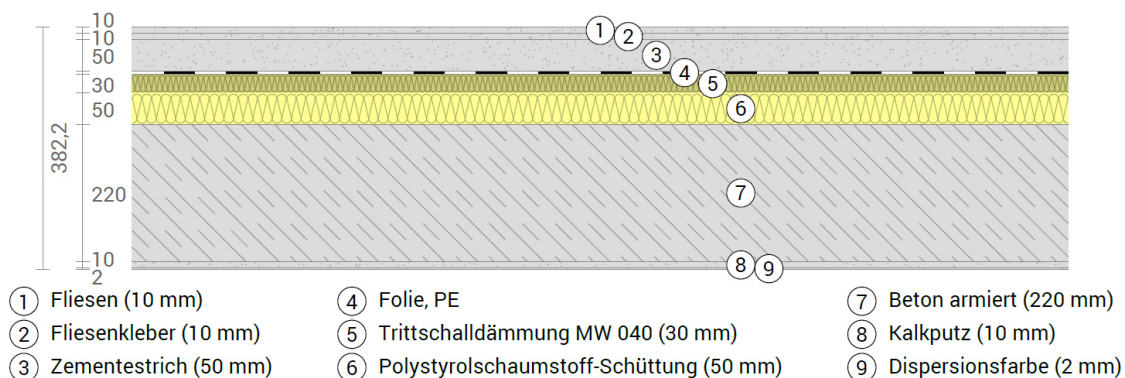


Abb. 27: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Verkehrsbereich (KNB-Variante)

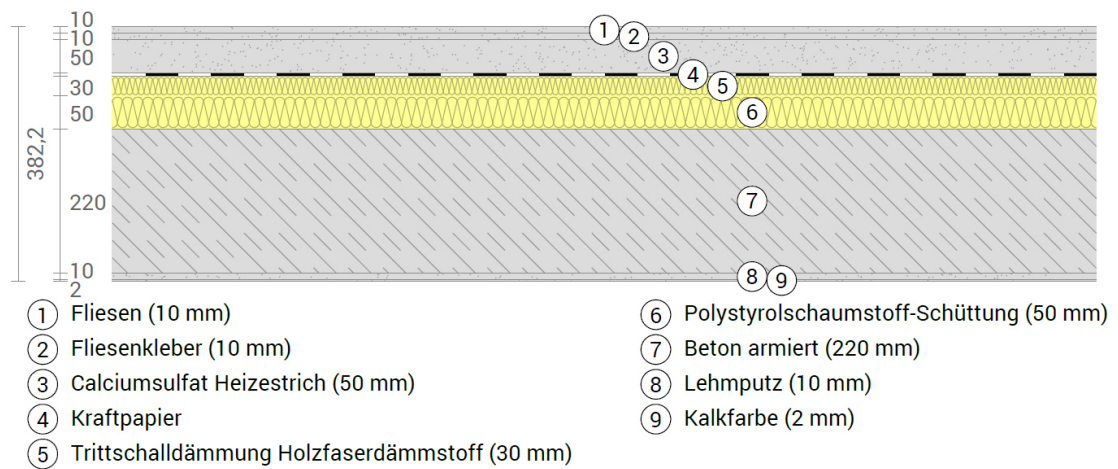


Abb. 28: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Verkehrsbereich (KFK-Variante)

Dachterrasse allgemein

Im Bestand ist keine Dachterrasse vorhanden. Das zweite Obergeschoss im Bestand ist komplett mit einem Satteldach überdeckt, während in der Sanierung die Außenwände etwas nach innen gesetzt werden und somit Raum für eine Dachterrasse entsteht (vgl. Abb. 6). Die Stahlbeton-Tragstruktur bleibt erhalten, der Bodenbelag wird allerdings erneuert, da bei einer Terrasse andere Anforderungen entstehen als bei einer Innendecke. Als Vorlage für den Dachterrassenaufbau wird der Sanierungsvorschlag von Zelger et al. (2017, S. 163) zur Sanierung eines Flachdaches in einem Gebäude der 1970er Jahre verwendet. Hier wird der Dachaufbau bis zur Oberkante der Rohdecke entfernt, damit der Wärme- und Feuchteschutz fachgerecht ertüchtigt werden kann. Diese nicht belüftete Warmdachkonstruktion ist für Flachdächer generell eine gute Lösung wegen ihrer kompakten Schichtfolge, dem effektiven Schutz der Dämmung vor Feuchtigkeit und der mechanischen Belastbarkeit, was verschiedene Dachflächennutzungen u. a. als begehbare Dachterrasse ermöglicht. (BauNetz, o. J.i)

Dachterrasse in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Die Innenbekleidung wird von der Innendecke und den tragenden Innenwänden übernommen und besteht dementsprechend aus Kalkputz und Dispersionsfarbe. Für die über der Betondecke liegende Dampfdruck-Ausgleichsbahn wird meist eine Bitumen-Lochvliesbahn mit einem Lochanteil von ca. 15 % verwendet. (Zwiener & Figl, 2018, S. 94, 135) Für Bitumenwerkstoffe stehen in der Ökobaudat im Allgemeinen nur wenige Datensätze zur Verfügung, welche die Bandbreite der verwendeten Bitumen-Materialien in der Baukonstruktion bei weitem nicht abbilden können. Daher wird für alle verwen-

deten Bitumenwerkstoffe der nächstliegende Datensatz je Anwendungsbereich ausgewählt. Die Wahl für die Dichtungsbahnen fällt auf Polymerbitumenbahnen, für die Flachdachdämmung wird der gängig verwendete Dämmstoff aus extrudiertem Polystyrol (XPS) angesetzt. Dieser besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/mK, was wiederum dem Mittelwert der üblichen Wärmeleitfähigkeiten des Baustoffes (0,030 bis 0,040 W/mK) entspricht. (Neroth & Vollenschaar, 2011, S. 1153) Es ergibt sich eine benötigte Dämmstoffstärke von 22 cm, um den gewünschten U-Wert von 0,14 W/m²K zu erreichen. Darüber wird erneut eine Dampfdruckausgleichsschicht und eine Polymerbitumenabdichtung angebracht. Oberhalb wird ein Vlies verlegt und eine Kiesschicht aufgeschüttet. Als Abschluss dient ein Terrassenbelag aus unbehandeltem Holz. Insgesamt folgt daraus der folgende Bauteilaufbau mit U = 0,14 W/m²K:

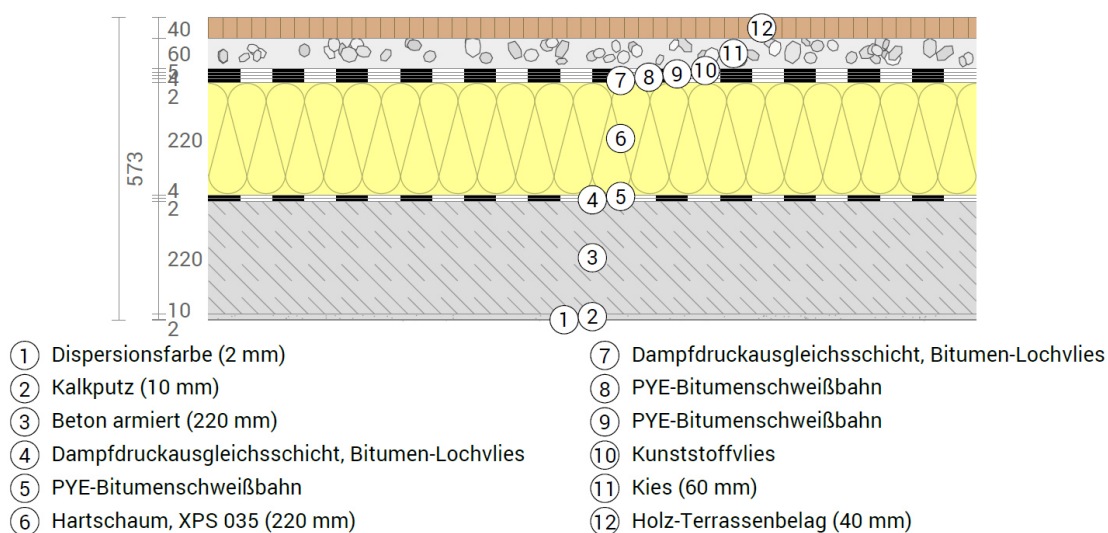


Abb. 29: Bauteilaufbau der Dachterrasse (KNB-Variante)

Dachterrasse in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Prinzipiell wird in der KFK-Variante derselbe Aufbau wie in der KNB-Variante angenommen. Die Bitumenbahnen werden aufgrund der fehlenden Datensatz-Alternativen beibehalten, obwohl es ökologischere Ersatzprodukte für diesen Anwendungsbereich gibt (Khouli et al., 2014, S. 89). Lediglich die XPS-Dämmung wird durch eine Holzfaserdämmung ersetzt. Obwohl häufig das Vorurteil laut wird, dass natürliche Dämmmaterialien nicht für den Flachdachbau geeignet sind, gibt es inzwischen einige Hersteller, die passende Produkte für diesen Anwendungsbereich bereitstellen (Dorsch, Kaiser, Niklasch, Schöpfgens & Spitzendorfer, 2017, S. 32–41). Im Gesamtaufbau ergibt sich daraus ein U-Wert von 0,18 W/m²K.

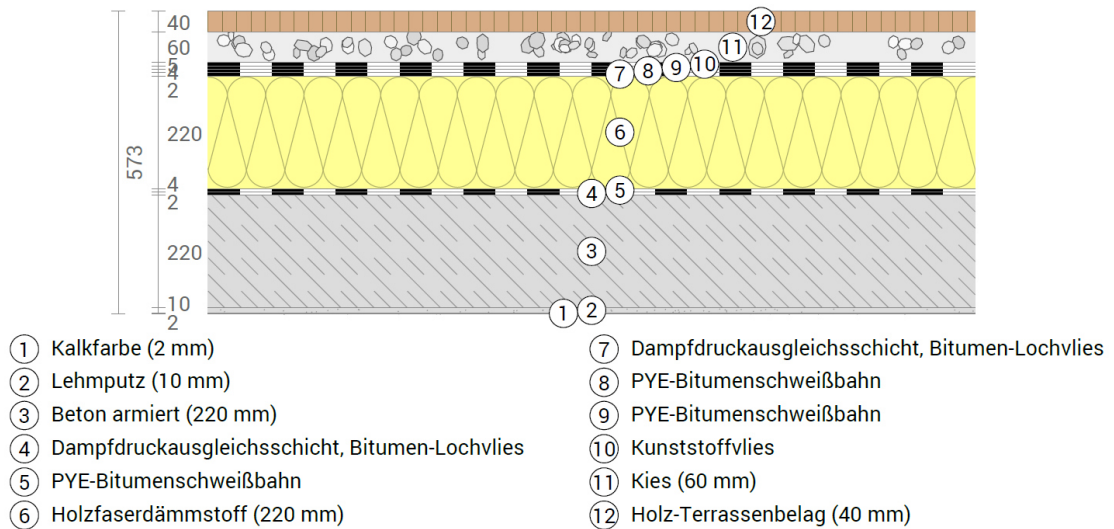


Abb. 30: Bauteilaufbau der Dachterrasse (KFK-Variante)

Satteldach allgemein

Da das Bestandsdach ohnehin abgerissen und erneuert wird, ist die Bestandskonstruktion und auch ihre Tragstruktur nicht relevant und wird hier nicht behandelt. Wie auch bei den anderen Bauteilen ist die Planung der Aufbauten, welche tatsächlich umgesetzt werden sollen, noch nicht bekannt und wird daher eigens festgelegt. Da das künftig sanierte Gebäude des DAVs ein geneigtes Dach besitzt, fällt hier die Entscheidung auf einen Sparrendachstuhl. Wird eine Dämmung der Wärmeleitgruppe 040 verwendet, gilt eine Dicke von 240 mm als grundsätzlich ausreichend (BauNetz, o. J.m). Weil die Anforderung an den U-Wert mit $U = 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ aber sehr hoch liegt und die Sparren noch immer eine Wärmebrücke darstellen, wird die Zwischensparrendämmung durch eine Untersparrendämmung ergänzt, bis der gewünschte U-Wert erreicht wird. Diese Lage kann außerdem als Installationsebene dienen. Als Vorlage für den Konstruktionsaufbau dient ein passender Aufbau von DataHolz. (Dataholz.eu, o. J.)

Satteldach in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Für die tragende Konstruktion aus Holz wird auf Konstruktionsvollholz, für die Zwischensparrendämmung auf Mineralwolle zurückgegriffen. Die Untersparrendämmung ist ebenfalls mit Mineralwolle gefüllt. Da die Querlattung im Gegensatz zu den Sparren keine strengen Qualitätsvorschriften erfüllen muss, können hier einfache Holzlatten aus Fichtenholz zum Einsatz kommen. Für die dazwischenliegende Dampfbremse wird gängigerweise Polyethylen verwendet (BauNetz, o. J.f). Als Beplankung des Sparren-

daches wird wie bei den Trockenbau-Innenwänden eine Gipsfaserplatte mit Dispersionsfarbe eingesetzt. Oberhalb der Tragkonstruktion folgt eine Unterdeckplatte, die meist aus Holzfasern bestehen. Ihre Funktion ist die Herstellung von Winddichtigkeit und Verhinderung von Wassereintritt. (BauNetz, o. J.k) Darüber ist ebenfalls aus getrocknetem Fichtenholz die Hinterlüftung zu finden. Als Dacheindeckung wurde der Dachziegel gewählt. (BauNetz, o. J.b) Zusammenfassend ergibt sich daraus folgender Systemaufbau für das Satteldach, welche einen U-Wert von 0,14 W/m²K aufweist:

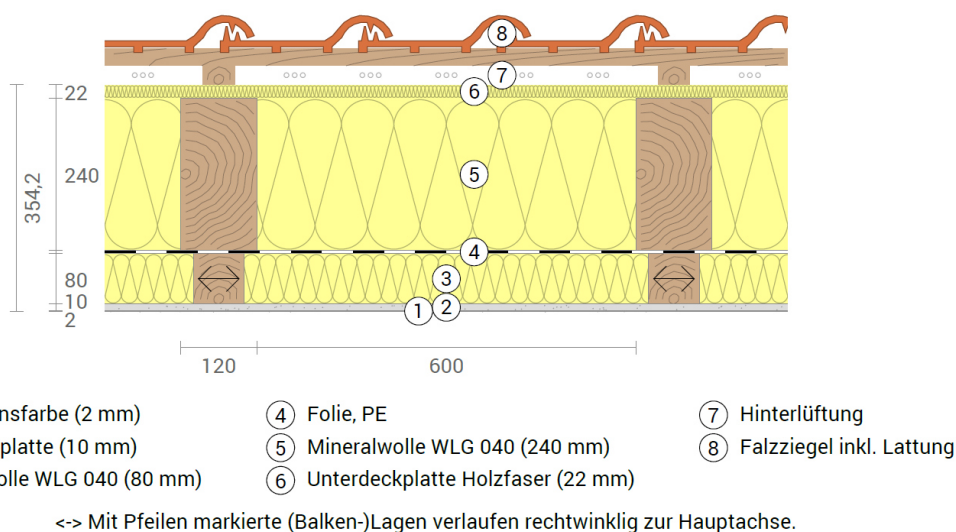


Abb. 31: Bauteilaufbau des Satteldachs (KNB-Variante)

Satteldach in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Am Dachbelag selbst wird im Vergleich zur KNB-Variante in der KFK-Variante nichts geändert. In der Tragkonstruktion wird die Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle erneut durch Holzfaserdämmung ersetzt. Als Ersatz für die Dampfbremse aus Kunststoff kommt wie im Bodenaufbau Kraftpapier zum Einsatz (Khouli et al., 2014, S. 89). In der Untersparrendämmung wird erneut Holzfaserdämmstoff verwendet. Die Konstruktion ist zum Abschluss mit einer Lehmbauplatte beplankt und mit Kalkfarbe beschichtet. Es ergibt sich der folgende Aufbau mit einem U-Wert von 0,15 W/m²K:

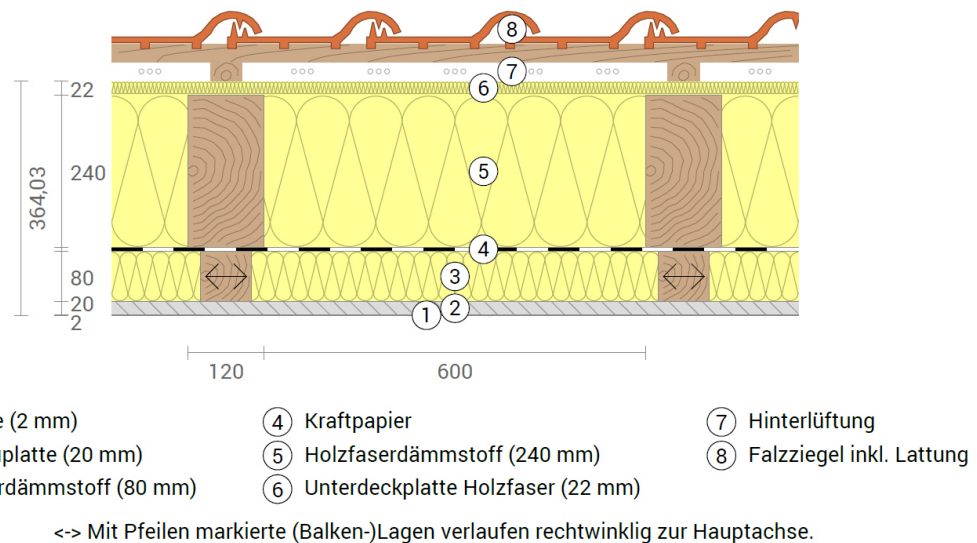


Abb. 32: Bauteilaufbau des Satteldachs (KFK-Variante)

Fenster und Türen

Wie die Bestandsfenster und -türen aufgebaut sind, ist nicht relevant, da davon ausgegangen wird, dass ohnehin ein Austausch dieser zur energetischen Ertüchtigung stattfindet. PVC-Rahmenfenster besitzen bei weitem den höchsten Marktanteil (Zwiener & Figl, 2018, S. 175–176) und werden deshalb für die KNB-Variante ausgewählt. Als klimafreundliche Alternative wird in der KFK-Variante ein Holzrahmen angesetzt. Der Rahmenanteil wird im Mittel auf 30 % festgesetzt (Verband Fenster + Fassade [VFF] & Bundesverband Fachglas e.V., 2014). Wegen des hohen energetischen Standards der Fenster (vgl. Kapitel 5.2.3) wird von einer Dreifachverglasung ausgegangen. Die Eingangstüren werden jeweils mit denselben Materialien angenommen wie die Fenster. Der Verglasungsanteil in den Haustüren wird anhand eines Beispiels aus der Komponentendatenbank des Passivhausinstituts mit 30 % angenommen. (Passivhaus Institut, 2023a) Beide Komponenten werden dabei nicht wie alle anderen Bauteile in Excel berechnet, sondern wegen der einfacheren Umsetzung im vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung bereitgestellten Ökobilanzierungstool eLCA. Zusätzlich zu den Blend- und Flügelrahmen aus PVC bzw. Holz und der Dreifachverglasung werden je Bauteil ein Griff und zwei Drehkippen-Beschläge (BauNetz, o. J.d) verwendet, die Anschlussfugen besteht aus Polyurethan (BauNetz, o. J.e). Die Innentüren werden in beiden Sanierungsvarianten einheitlich mit dem Material Holz angenommen. Dazu wurde eine Konstruktionsvorlage aus eLCA direkt verwendet, in der eine Röhrenspanplatte zwischen zwei Holzplatten eingeschlossen ist und das Holz mit Lacksystemen

beschichtet ist. Die LCA-Ergebnisse, welche das Tool eLCA herausgibt, werden anschließend auf 1 m² Fenster- oder Türfläche umgerechnet und können somit auf alle Flächen übertragen werden.

5.2.5. Massenermittlung zur Bilanzierung der grauen Energie

Mit den in Kapitel 5.2.4 erarbeiteten Aufbauten und den zugehörigen Datensätzen der Ökobaudat kann nun die Massenbilanzierung zur Ermittlung der grauen Emissionen beider Sanierungsvarianten durchgeführt werden. In Abb. 33 ist die Flächenverteilung der Bauteile aufgezeigt, welche für beide Sanierungsvarianten gleich ist. Vor allem die Innenbauteile, also Decken und Innenwände machen einen Großteil der zu sanierenden Flächen aus. In Anbetracht des deutlich stärkeren Aufbaus der Decken im Vergleich zu den Innenwänden besitzen diese mit Abstand den höchsten Anteil in der Massenverteilung (vgl. Abb. 34). Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten in der Massenverteilung resultieren aus verschiedenen Rohdichten der verbauten Baustoffe.

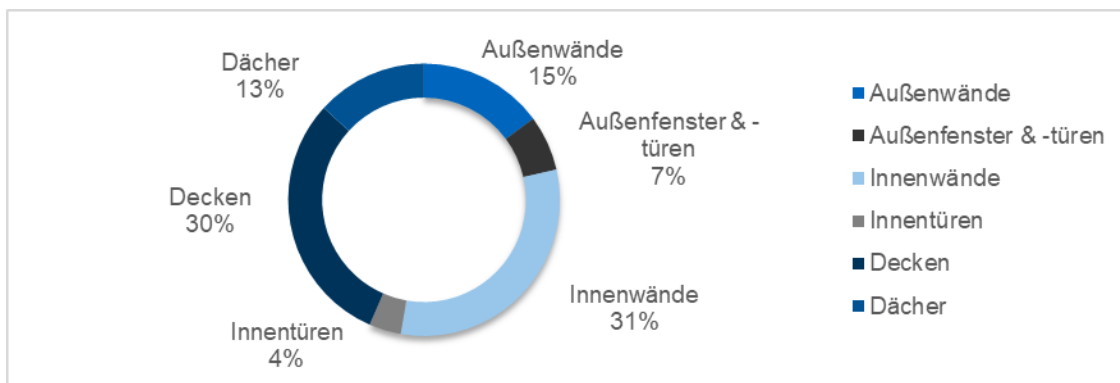


Abb. 33: Flächenverteilung der Bauteile

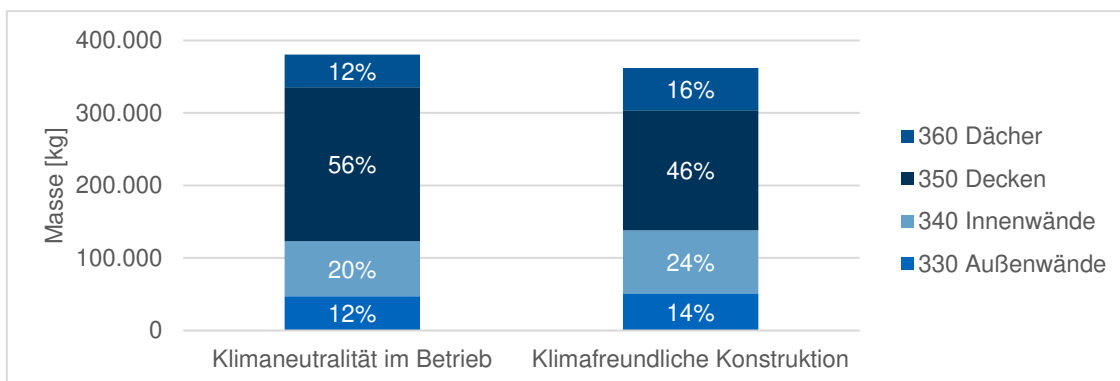


Abb. 34: Massenverteilung nach Kostengruppen

In der folgenden Abb. 35 kann das Volumenverhältnis der Baustoffe zueinander für beide Sanierungsvarianten entnommen werden. Sie zeigt auf, dass die Dämmungen volumenmäßig den Großteil der verbauten Baustoffe ausmachen. Für beide Varianten beläuft sich der Anteil dieser auf ca. 50 %. Dies rührt daher, dass Isolierungen in fast allen Bauteilen, z. B. auch im Innenbereich zu Schalldämmung, verwendet werden. Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Bereich der Dämmung stellt damit einen enormen Stellhebel dar, um das GWP des Gebäudes zu verringern. Durch den hohen Flächenanteil liefern auch die Schichten im Bodenaufbau wie z. B. der Estrich sowie Putzschichten, die bei allen Bauteilen vorkommen, hohes Potenzial zur Verbesserung.

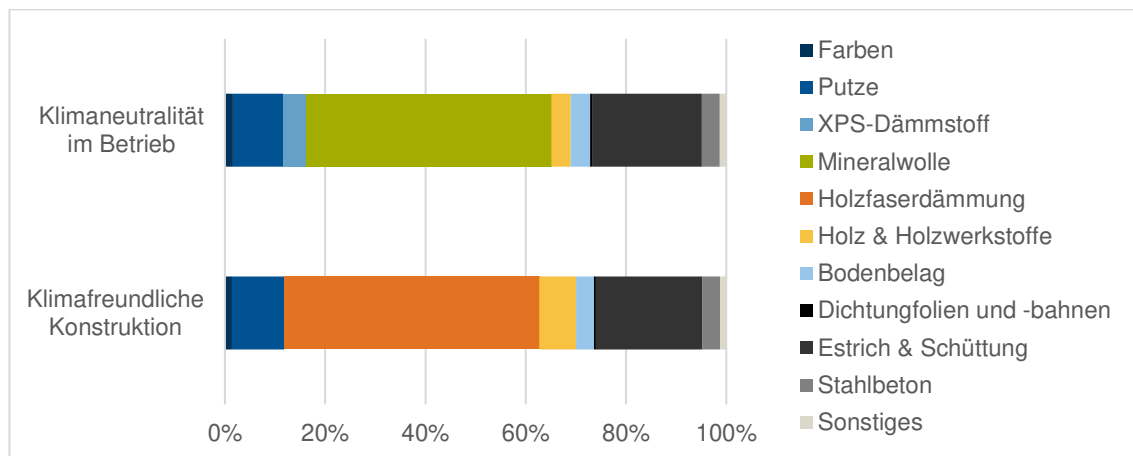


Abb. 35: Volumenverteilung nach Baustoffen

5.3. Wirkungsabschätzung der statischen LCA

Aus Konstruktion und TGA ergeben sich über den Lebensweg ohne die Betrachtung der Nutzungsphase B6 die in Abb. 36 aufgezeigten Ergebnisse. Für die KNB-Variante beläuft sich das spezifische GWP auf 9,5 kg CO₂-Äqv/m²a, für die KFK-Variante ergibt sich der deutlich geringere Wert von 6,0 kg CO₂-Äqv/m²a. Da die TGA für beide Varianten gleich angesetzt wird, besitzt sie relativ gesehen in der KFK-Variante einen deutlich höheren Anteil. Die Energieerzeuger machen dabei nur einen kleinen Teil der TGA aus, während mit über 80 % der größte Anteil durch den pauschalen TGA-Zuschlag definiert wird (vgl. Anhang 7).

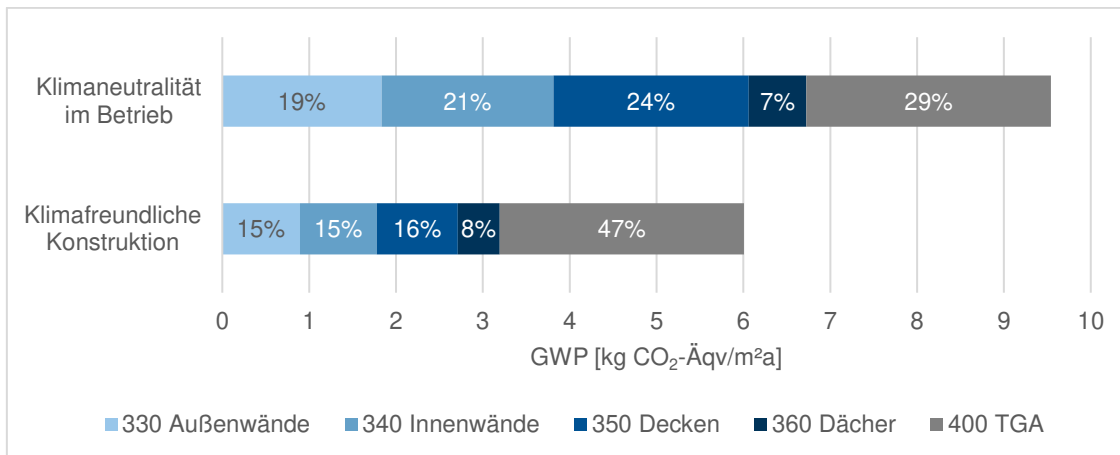


Abb. 36: GWP nach Kostengruppen (SLCA ohne B6)

Der deutlich geringere Anteil der Dächer im Vergleich zu den anderen Kostengruppen in Abb. 36 ergibt sich einerseits aus den geringeren Flächenanteilen und andererseits aus der vergleichsweise geringen Umweltwirkung des Satteldaches, welches auch in der KNB-Variante zu großen Teilen aus Holz besteht. In Abb. 37 ist das GWP der einzelnen Bauteilflächen beider Varianten abgebildet. Die Tragstruktur aus Beton ist in den Werten nicht berücksichtigt, da sie bereits im Bestand existiert. Insgesamt ist die Optimierung der Bauteile in der KFK-Variante deutlich ersichtlich durch die hohen Differenzen zwischen den Varianten. Die Fensterflächen besitzen in beiden Varianten die höchsten spezifischen Umweltwirkungen, gefolgt von Außentüren und Dachterrassenflächen. Letztere besitzen aber auch ein hohes Potenzial zur Nachnutzung bedingt durch die Dämmstoffe und den Holz-Terrassenbelag. Generell ist das Nachnutzungspotenzial in der KFK-Variante tendenziell höher als in der KNB-Variante. Das GWP je m² Bauteilfläche für die verschiedenen Bekleidungen und Beschichtungen einzeln ist in Anhang 7 abgebildet.

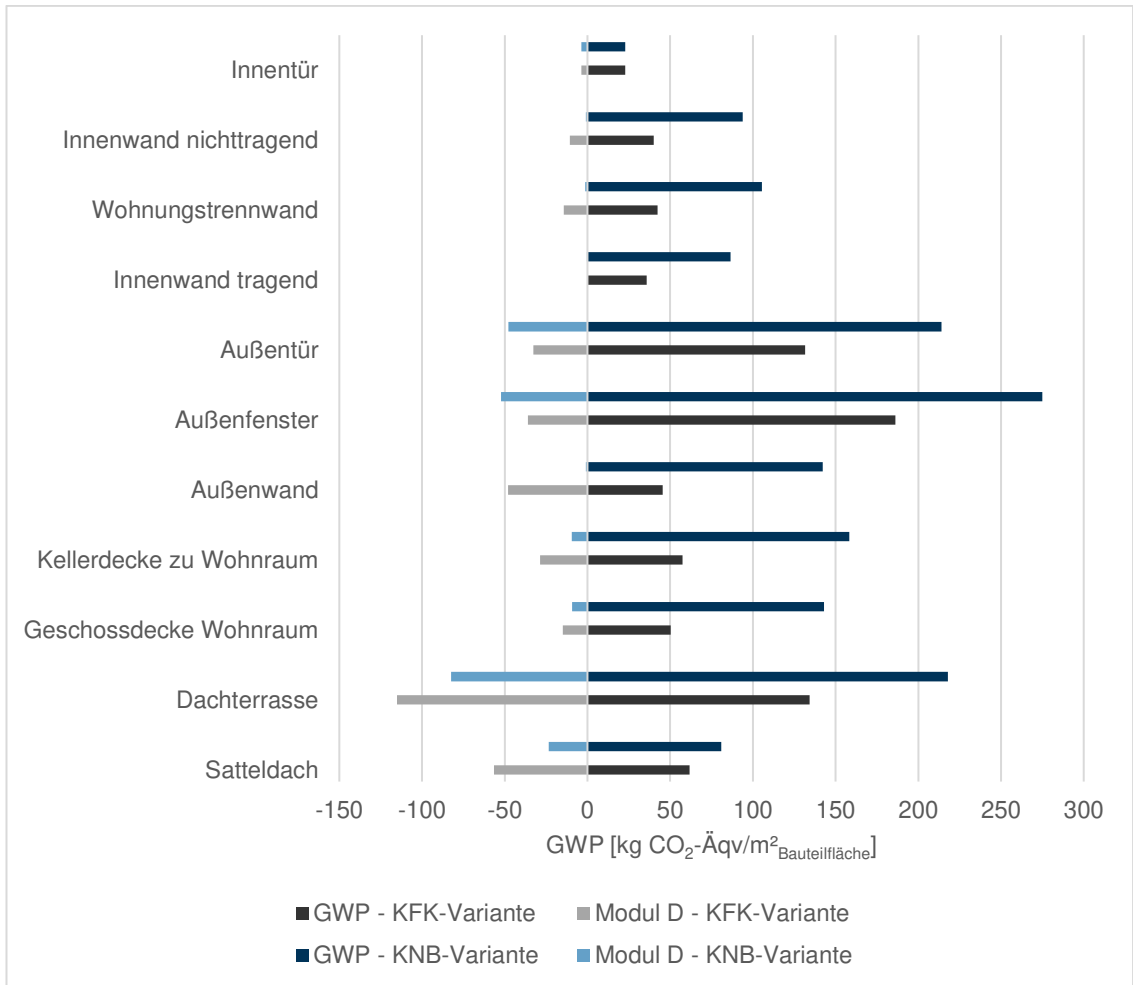


Abb. 37: GWP je m² Bauteilfläche (SLCA)

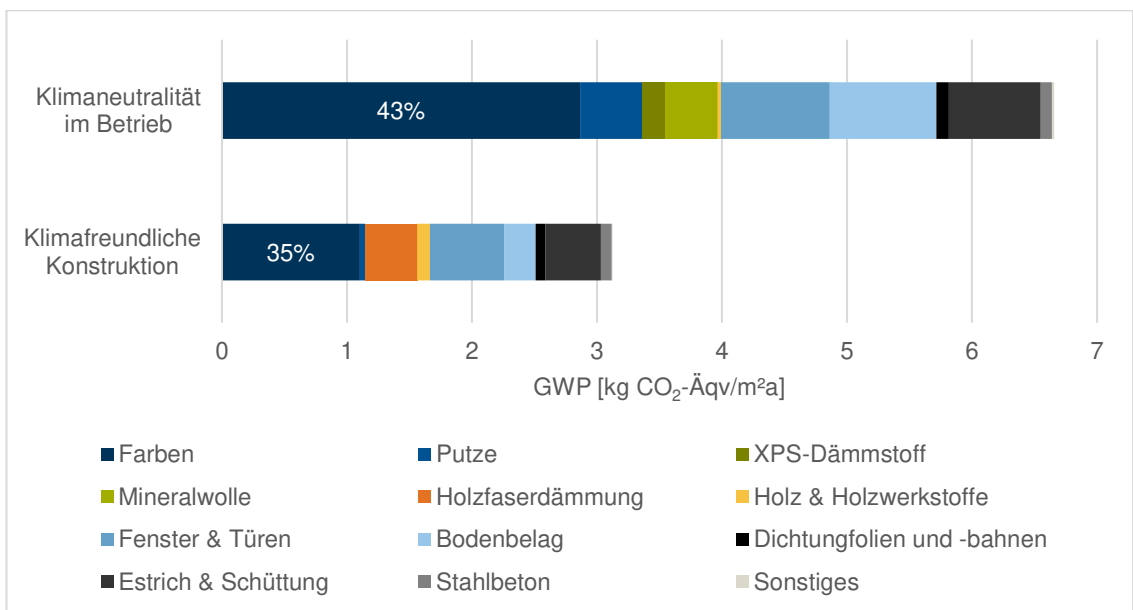


Abb. 38: GWP nach Baustoffen (SLCA)

Betrachtet man die Baustoffe und ihre Umweltwirkung einzeln, so fällt besonders der hohe Einfluss der Farbe auf (vgl. Abb. 38). Obwohl diese nur eine sehr dünne Schicht ist und dementsprechend volumenmäßig kaum ins Gewicht fällt (vgl. Abb. 35), ist sie dennoch auf fast allen Bauteilflächen als Abschlussbeschichtung vertreten. Zusätzlich muss sie je nach Nassabriebsklasse alle 5 bis 15 Jahre erneuert werden (BMWSB, 2017). Durch die hohe Anzahl an Erneuerungen und die großen Flächenanteile ergibt sich im Vergleich zu den anderen Baustoffen ein beträchtlicher Einfluss. Hohes Potenzial zur GWP-Minderung besitzt zudem die Verwendung von Lehm in Putz- und Trockenputzsystemen. Einen moderaten Beitrag liefern außerdem die Wahl des Estrichs, des Bodenbelags sowie des Rahmenmaterials für Fenster und Türen. Der Stahlbeton in den Neubaukonstruktionen der Außen- und Innenwände macht zwar nur einen kleinen Teil des GWPs aus, kann aber natürlich dennoch vermieden werden durch die Verwendung eines anderen Konstruktionsaufbaus. Bezüglich der verwendeten Dämmungen ist der Holzfaserdämmstoff ohne Betrachtung des Nachnutzungspotenzials lediglich geringfügig besser als die Mineralwolle. Würde man Modul D miteinbeziehen, würde die Holzfaserdämmung jedoch negativ in die Bilanz eingehen.

In der Nutzungsphase werden für den Energiebedarf in der SLCA statische Emissionsfaktoren hinterlegt, d.h. über den gesamten Lebensweg ändert sich der CO₂-Ausstoß je kWh Strom nicht. Bei der Variante *Klimaneutralität im Betrieb* liegt der Energiebedarf übers Jahr gesehen bei null, da der Strombedarf über die eigene PV-Anlage vollständig gedeckt wird. Der Energiebedarf in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion* liegt somit bei der Differenz, welche gerade nicht mehr durch den Solarertrag gedeckt werden kann: 3,8 kWh/m²a. Für 2023 wird von einem Emissionsfaktor von 392 g CO₂/kWh ausgegangen, was dem interpolierten Wert zwischen dem Emissionsfaktor von 2022 und dem Zielwert in 2030 entspricht. Dieser Emissionsfaktor wird für alle Jahre bis zum Lebensende angesetzt. Auf spezifische CO₂-Emissionen umgerechnet ergeben sich damit für die KFK-Variante 1,1 kg CO₂-Äqv/m²a. In Abb. 39 sind die Treibhausgasemissionen aufgeteilt in die verschiedenen Lebenswegphasen zu sehen. Im Modul B6 ist außerdem der Endenergiebedarf angedeutet, welcher durch den Solarertrag gedeckt wird (gepunktete Balken). Die Herstellungsphase sowie der Austausch von Komponenten bedingen den größten Teil der Umweltwirkungen in der KNB-Variante. Die Emissionen der KFK-Variante werden vor allem durch den Austausch der Komponenten und die EoL-Phase bestimmt. Im EoL wird bei nachwachsenden Rohstoffen jener Kohlenstoff, der beim Wachsen aufgenommen wurde, wieder frei. Die Nutzungsphase macht 15 % des GWPs aus. (Vgl. Anhang 7)

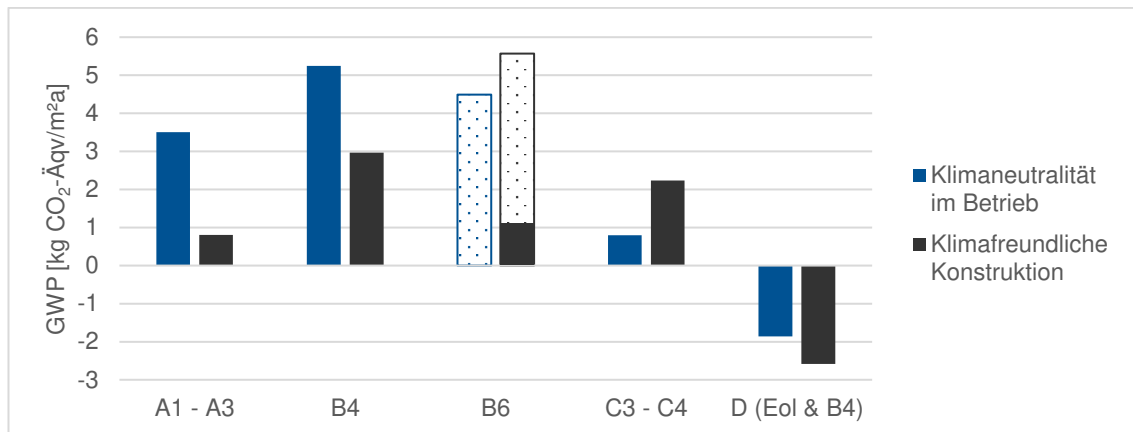


Abb. 39: Treibhausgasemissionen über den Lebensweg (SLCA)

Insgesamt bleibt das Gesamt-GWP in der KNB-Variante bei 9,5 kg CO₂-Äqv/m²a, während das GWP in der KFK-Variante gesamt bei 7,1 kg CO₂-Äqv/m²a liegt. Modul D ist in diesen Werten nicht verrechnet. Mit Einbezug von Modul D würden die Werte bei 7,7 kg CO₂-Äqv/m²a (KNB-Variante) bzw. 4,5 kg CO₂-Äqv/m²a (KFK-Variante) liegen.

5.4. Interpretation der SLCA-Ergebnisse

Die Variante *Klimafreundliche Konstruktion* schneidet während der Nutzungsphase schlechter ab als die Variante *Klimaneutralität im Betrieb*. Über den Lebensweg gesehen werden jedoch ca. 26 % weniger Emissionen freigesetzt. Die Handlungsempfehlung an den Bauherrn, welche der beiden Sanierungsvarianten in Bezug auf das Klima zu empfehlen ist, liegt damit eindeutig zugunsten der KFK-Variante. Auch den Grenzwert der DGNB für die konstruktionsbedingten Emissionen von 4,7 kg CO₂-Äqv/m²a kann die KFK-Variante mit Einbezug von Modul D leicht einhalten. Möchte oder kann der Bauherr nicht alle Optimierungen in der KNB-Variante vornehmen, werden im Folgenden die größten Stellschrauben identifiziert, um zumindest den Grenzwert zu erreichen. Dazu zählen zuallererst die Wand- und Deckenbekleidungen im Innenraum (Abb. 40), welche die emissionsintensive Farbe beinhalten. An zweiter Stelle steht der Deckenbelag, welcher durch den PVC-Bodenbelag, den Zementestrich sowie die PS-Schüttung einen relativ hohen CO₂-Ausstoß bedingt. Aber auch die WDVS-Außenwandbekleidung und die PVC-Fenster bieten Verbesserungspotenziale. Werden die ersten drei der aufgeführten Potenziale gezogen, indem die Bauteilaufbauten der KNB-Variante ersetzt werden durch jene der KFK-Variante, kann der DGNB-Richtwert eingehalten werden.

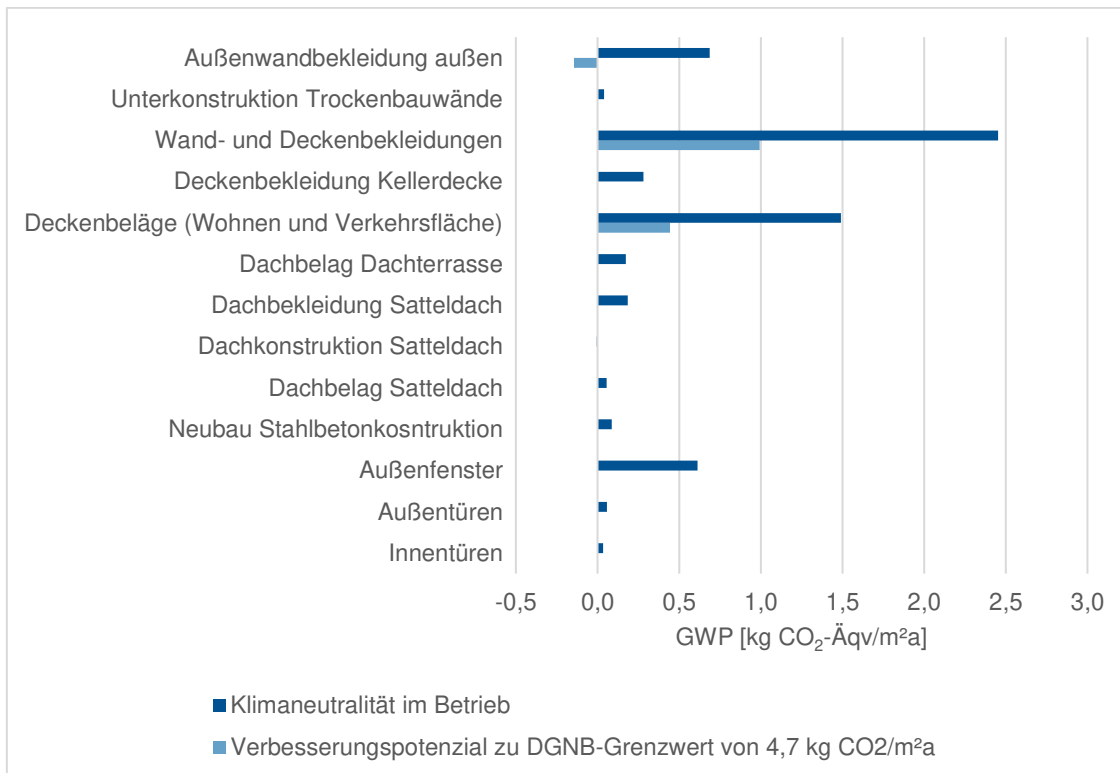


Abb. 40: GWP nach Bauteilschicht in der KNB-Variante und Verbesserungspotenziale (SLCA mit Verrechnung von Modul D)

Betrachtet man die Differenz zwischen den Ergebnissen beider Varianten, wird klar, dass die nationalen politischen Ziele eines klimaneutral betriebenen Gebäudebestandes in 2045 (vgl. Kapitel 5.1.2) nur zum Teil sinnvoll sind, da die grauen Emissionen außer Acht gelassen werden und diese aber bei energieeffizienten Gebäuden durchaus einen beträchtlichen Anteil ausmachen. Die Ziele im Gebäudesektor sollten daher eher klimaneutral erstellte Gebäude anstreben. Obwohl in der KFK-Variante alle Bauteilschichten im Rahmen der vorhandenen Datenbasis der Ökobaudat optimiert worden sind, wird über den gesamten Lebensweg keine Treibhausgasbilanz von null erreicht. Damit dieses Ziel umgesetzt werden kann, müssen die Verarbeitungsprozesse sowie die Materialzusammensetzungen auch bei den klimafreundlichen Baustoffen noch weiter verbessert werden. Außerdem sollte der Fokus in der Baustoffbranche zukünftig auf Kaskadennutzung und Zirkularität gelenkt werden, damit das spezifische GWP sinkt.

6. Implementierung dynamischer CO₂-Emissionsfaktoren in die vorstehende LCA

In diesem Kapitel werden im Kontrast zu der vorhergehenden Ökobilanz Wärme und Strom als dynamische Parameter miteinbezogen. Die Energieversorgung trägt zu großem Teil zu betriebsbedingten und grauen Treibhausgasemissionen von Gebäuden bei, wodurch ihre Entwicklung enormen Einfluss auf die Umweltverträglichkeit nimmt. Sie ist folglich als wichtige dynamische Variable anerkannt. (Su et al., 2021, S. 26204–26205) Ziel der Studie ist eine Abschätzung, welchen Einfluss die Dynamik der Energieversorgung auf die Treibhausgasemissionen besitzt und dementsprechend auch die Beurteilung, inwieweit die Ergebnisse einer herkömmlichen LCA davon abweichen.

6.1. Untersuchungsrahmen in der DLCA

Im Prinzip gelten dieselben Rahmenbedingungen in der DLCA wie auch in der SLCA: Lebensdauern, Aufbauten, untersuchte Lebenswegphasen, funktionelle Einheit, Verrechnung des pauschalen TGA-Aufschlages, etc. (vgl. Kapitel 5.1) Auch die bereits ermittelten Sachbilanzdaten aus Kapitel 5.2 bleiben bestehen und bilden die Grundlage für die DLCA. Lediglich die Datensätze selbst werden remodelliert und der GWP-Anteil von Strom und Wärme wird dynamisch betrachtet. Die Datensätze aus der Ökobaudat bilden die Basis, die Informationen zu den GWP-Anteilen werden aus der Ecoinvent *Version 3.9.1 (2022)* übernommen. Als Systemmodell wird *Allocation, cut-off by classification* gewählt, das in den älteren Versionen das einzig verfügbare Modell gewesen ist und dessen Verwendung von Ecoinvent im Allgemeinen empfohlen wird. (Ecoinvent, 2022) Da die Ecoinvent keine deutsche Organisation ist, sind ihre Datensätze oftmals nicht spezifisch für Deutschland gültig. In vielen Fällen wird deshalb auf europäisch oder sogar weltweit gültige Datensätze zurückgegriffen. In der Ecoinvent wie auch in der Ökobaudat sind die vorhandenen Datensätze außerdem teilweise nur bis zum Ende des Jahres 2022 gültig, welche aber dennoch in dieser Arbeit verwendet werden, da bisher keine neueren Daten zur Verfügung stehen. Alle verwendeten Ökobaudat- und zugehörige Ecoinvent-Datensätze sind in Anhang 5 aufgeführt.

6.1.1. Grenzen der dynamischen Betrachtung

Wie bereits aufgezeigt, wird in der hier durchgeführten LCA nur die Energieversorgung mit Strom und Wärme dynamisch betrachtet. Andere sich über die Zeit ändernde Parameter wie die klimatischen Bedingungen und der daraus resultierende Energieverbrauch, die Degradation von Materialien und Geräten, die Entwicklung der Nutzer und ihres Verhaltens, technologische Neuerungen, Abfallrecyclingraten, veränderte Materialzusammensetzungen, u. v. m. werden in dieser Studie nicht miteinbezogen. Dies ist einerseits auf den enorm hohen Aufwand der Umsetzung zurückzuführen, aber vor allem auch auf das Fehlen der benötigten Datenbasis in den aktuellen Sachbilanzdaten sowie auf die Schwierigkeit, die künftige Entwicklung von einigen Parameter abschätzen zu können. (vgl. Kapitel 4)

Aber auch die alleinige Implementierung der elektrischen Energieversorgung als dynamischer Parameter wirft gewisse Grenzen auf. Für diese Studie wird das Zeitraster auf ein Jahr festgesetzt, d. h. innerhalb eines Jahres wird ein Durchschnittswert für den Emissionsfaktor verwendet. Generell kann die Umweltwirkung des Strommixes aber nicht als statisch über ein Jahr betrachtet werden. Je nach Tages- und Jahreszeit ändert sich der Emissionsfaktor durch die Fluktuation der erneuerbaren Energien. Nach Roux, Schalbart und Peuportier (2016, S. 532) kann die Verwendung eines durchschnittlichen Strommixes übers Jahr im Vergleich zur Verwendung von stündlichen Daten bei einem energieeffizienten Gebäude zu einer Unterschätzung des GWPs von 36 % führen. Stromverbrauch und Stromerzeugung fallen zeitlich nicht immer zusammen, wodurch auch in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb* während der Nutzungsphase zeitweise Strom aus dem Netz bezogen werden muss und ggf. zu anderer Zeit eingespeist wird. Und auch in den grauen Emissionen des Gebäudes würden sich diese Schwankungen je nach Zeitpunkt des Verarbeitungsprozesses widerspiegeln. Eine Vorhersage von stündlichen Emissionsfaktoren über die nächsten 50 Jahre wie auch der genauen Produktionszeiten von Baustoffen ist allerdings nicht möglich. Daher wird in dieser Arbeit die Annäherung eines durchschnittlichen Strommixes über ein Jahr akzeptiert. Eine weitere Einschränkung bildet die Annahme, dass der bundesweite Strommix repräsentativ ist. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass der lokale Strommix einzelner Stromanbieter davon abweichen kann sowie einige Bauteile im Ausland produziert oder verwertet werden können (Potrč Obrecht et al., 2021, S. 843).

Die nationale Repräsentativität wird in dieser Arbeit ebenso für die Implementierung der Prozesswärme angenommen. Die Umweltwirkungen durch die Wärmeprozesse bzw. ihre prozentuale Dekarbonisierung werden demnach nach den deutschen Klimazielen angesetzt (vgl. Kapitel 3 und 6.1.1). Bei einer Produktion von Baustoffen im Ausland können die Umweltwirkungen folglich abweichen. Zusätzlich dazu kann im Bereich der Prozesswärme prinzipiell kein allgemeiner Emissionsfaktor wie beim Strom angesetzt werden, zumal die Emissionen stark vom eingesetzten Energieträger je Anwendungsfall abhängig sind. Da es sich bei Prozesswärme i. d. R. nicht um einen Energieträgermix handelt, ist auch eine stetige Dekarbonisierung auf Bauproduktebene nicht realistisch. Vielmehr wird je nach benötigtem Temperaturniveau ein Energieträgerwechsel auf Wasserstoff, strombasierte Verfahren oder andere erneuerbare Energien wie Biomasse oder Tiefengeothermie stattfinden. (Münnich, Metz, Hauser, Kohn & Mühlpointner, 2022, S. 13–15) Im nationalen Gesamtkontext jedoch wird eine kontinuierliche Verbesserung angestrebt, die in dieser Arbeit gleichermaßen auf alle Bauprodukte übertragen wird.

Die Umweltwirkungen eines Bauprodukts werden wie oben bereits beschrieben in Emissionen durch Strom- und Wärmeversorgung und in Restemissionen geteilt (vgl. Abb. 2). Während das GWP durch die Energieversorgung mit der Zeit abnimmt, werden die Restemissionen als statisch angesetzt. Hierzu zählen Emissionen aus Vorprodukten bzw. Eingangsstoffen, welche für die Produktion des wesentlichen Endproduktes notwendig sind (vgl. Abb. 1). Die energetische Versorgung in den Hintergrundprozessen dieser Eingangsprodukte müsste wiederum berücksichtigt werden und ebenso in den vorhergehenden Ebenen der Produktion miteinbezogen werden. So kann der Einfluss des Strommixes am GWP beispielsweise nach Potrč Obrecht et al. (2021, S. 846) bis zu 15-mal höher sein, wenn die Hintergrundprozesse in mehreren Ebenen miteinbezogen werden. Da die Hintergrunddaten aber sehr verwoben sind, die relevanten Daten oftmals erst in hinteren Ebenen zu finden sind, sowie der Aufwand durch die Berücksichtigung exponentiell steigen würde, ist eine Umsetzung dessen in dieser Arbeit nicht möglich. Anhand eines beispielhaften Bauproduktes wird dieser Einfluss in der Sensitivitätsanalyse untersucht (vgl. Kapitel 6.3.2). Sicherlich wird der Einfluss von Strom und Wärme am GWP jedoch mit der gewählten Vorgehensweise unterschätzt und die Ergebnisse entsprechen somit einem konservativen Szenario.

Die Methodik selbst weist zudem einige Lücken auf. So müssen für jeden verwendeten Ökobaudat-Datensatz, welcher alle Lebenswegphasen des Bauproduktes ausweist, mehrere passende Ecoinvent-Datensätze für jede Phase einzeln recherchiert werden.

Bei manchen Bauprodukten sind diese aber nur für ausgewählte Lebenswegphasen vorhanden. Bei den Ausnahmefällen, in denen keine Ecoinvent-Daten vorhanden sind, werden folglich weiterhin statische Parameter in die Bilanz miteinbezogen. Zusätzlich dazu kann das Rechenverfahren nur auf positive Umweltwirkungen angewendet werden. Bei der Herstellung von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen, bei welchen die negativen Emissionen durch CO₂-Aufnahme während des Wachstums die positiven Emissionen durch den Produktionsprozess oftmals übersteigen, ergibt sich allerdings i. d. R. ein negatives GWP. Eine prozentuale Verbesserung, wie sie durch die DLCA-Methodik vorgegeben ist, ist bei negativen Werten nicht umsetzbar bzw. nicht sinnvoll. Damit müssen die Herstellungsprozesse (A1 bis A3) der nachwachsenden Rohstoffe wiederum mit den vorhandenen statischen Daten berechnet werden und die Ergebnisse sind erneut als konservativ kalkuliert einzustufen.

6.1.2. Künftige Entwicklung der Energieversorgung

Das Szenario, welches als dynamischer Parameter hinter die statischen Datensätze gelegt wird, ist Deutschlands Weg zur Klimaneutralität 2045. (vgl. Abb. 41) Durch das Klimaschutzgesetz wird ein CO₂-Reduktionspfad vorgegeben, der eine Minderung der Treibhausgase von 65 % bis 2030, 88 % bis 2040 und 100 % bis 2045 zum Bezugszeitpunkt 1990 vorsieht. Ab 2050 werden durch die Einbindung von Treibhausgasen in natürliche Senken negative CO₂-Emissionen angestrebt. Für die Jahre 2020 bis 2030 sind je Sektor konkrete zulässige Jahresemissionsmengen vorgegeben, ab 2030 sind bisher noch nur sektorübergreifende prozentuale Minderungsziele vorgeschrieben. (Bundesregierung, 2022) Die sektorspezifischen Ziele werden ggf. ebenso wieder aufgeweicht. (Tagesschau.de, 2023) Aus diesem Grund und weil Prozesswärme sich nicht spezifisch einem Sektor allein zuordnen lässt, werden sowohl für Wärme als auch für Strom die allgemeinen sektorübergreifenden Minderungsziele als Grundlage der Prognose verwendet. Die bisherige Entwicklung des Strommixes ist dabei bekannt (Umweltbundesamt [UBA], 2022; Kiesel, 2022, S. 36), während für die Entwicklung der Prozesswärme nur die allgemeine prozentuale Treibhausgasreduktion aller Sektoren in Summe angesetzt werden kann (BMWK, 2022a; UBA, 2023).

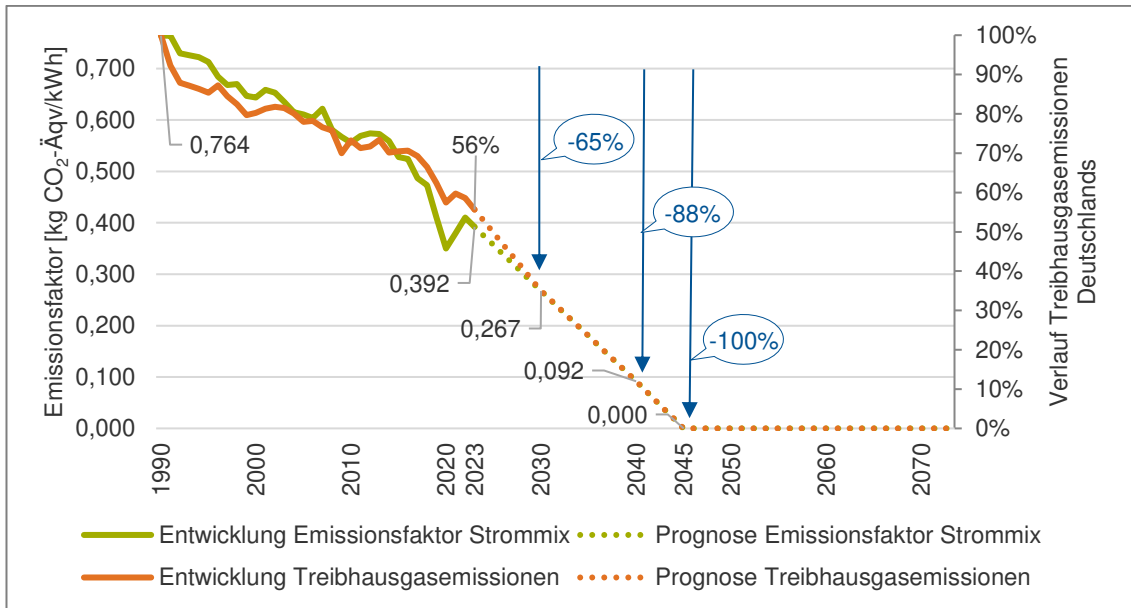


Abb. 41: Entwicklung und Prognose der Emissionen durch die Produktion von Strom und Wärme

6.1.3. Einfluss von Strom und Wärme auf die grauen Emissionen

Der Beitrag, den die Strom- und Wärmeproduktion am GWP eines Bauproduktes besitzt, ist selbstverständlich je Verarbeitungsprozess und Bauprodukt unterschiedlich und schwankt bei den verwendeten Produkten zwischen 0 % und 50 %. In Abb. 42 wird der durchschnittliche Anteil über die Bauprodukte je Variante gezeigt. In der Herstellungsphase von Baustoffen besitzen Strom und Wärme den größten Anteil, mit in Summe bis zu 14 %, wobei der größere Beitrag durch den Strommix zustande kommt. Besonders stromintensiv in der Herstellung ohne Einbezug der Hintergrundsysteme sind dabei Calciumsulfatestrich, Gipsfaserplatten, Kies, Fliesen und Lehmprodukte. In der Abfallverwertung treten vor allem nachwachsende Rohstoffe mit einem hohen Wärmeanteil auf, wodurch der durchschnittliche GWP-Einfluss der Wärme in der KFK-Variante bei ca. 8 % liegt. In der Abfallbeseitigung fällt die Energieversorgung kaum ins Gewicht.

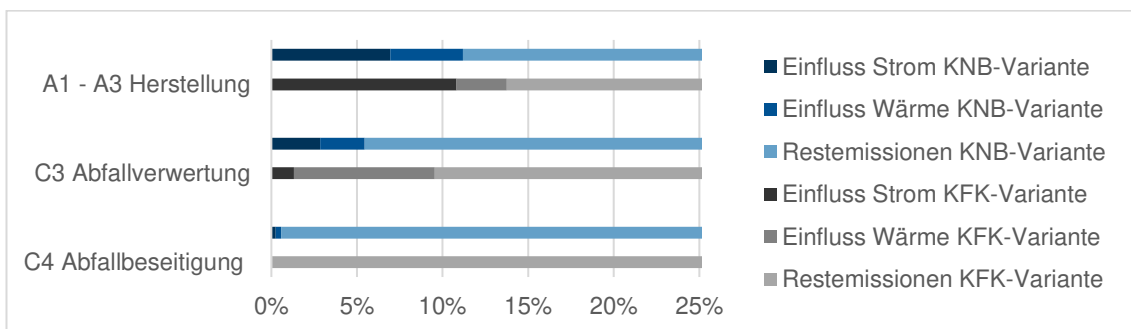


Abb. 42: Durchschnittlicher Einfluss von Strom und Wärme in den Lebenswegphasen

6.2. Wirkungsabschätzung der dynamischen LCA und Vergleich zur SLCA

Mit der Berücksichtigung der dynamischen Parameter und den in Kapitel 6.1.1 genannten Einschränkungen ergibt sich für die Konstruktion der KNB-Variante nun ein Gesamt-GWP von 9,2 kg CO₂-Äqv/m²a statt 9,5 kg CO₂-Äqv/m²a. Dies entspricht einer Minderung der theoretisch berechneten Werte um 4 %. In der SLCA fallen über den Lebensweg vor allem die Phasen A1 - A3 und B4 ins Gewicht (vgl. Abb. 43). Die Nutzungsphase B6 ist in der Abbildung nicht aufgeführt, da ohnehin keine Emissionen anfallen. Die Verbesserung der Ergebnisse ist größtenteils auf die weniger CO₂-intensive Herstellung der Produkte in Zukunft zurückzuführen, die sich besonders im Austausch von Komponenten (Modul B4) bemerkbar macht. Einige der besonders strom- und wärmeintensiven Komponenten wie z. B. Fliesen und Gipsfaserplatten werden allerdings über den Lebensweg nicht ausgetauscht. Dadurch ist die GWP-Reduktion durch die Implementierung der DLCA-Methodik in der KNB-Variante eher gering. Die leichte Minderung des GWPs in der Herstellungsphase rührt von der Zeitdifferenz zwischen Baujahr des Gebäudes und Referenzjahr der einzelnen Bauprodukte, in der bereits erste Ambitionen zur Dekarbonisierung der Energieversorgung umgesetzt wurden. Die Gutschriften nach dem EoL bleiben gleich, da in Modul D keine dynamischen Parameter implementiert werden können.

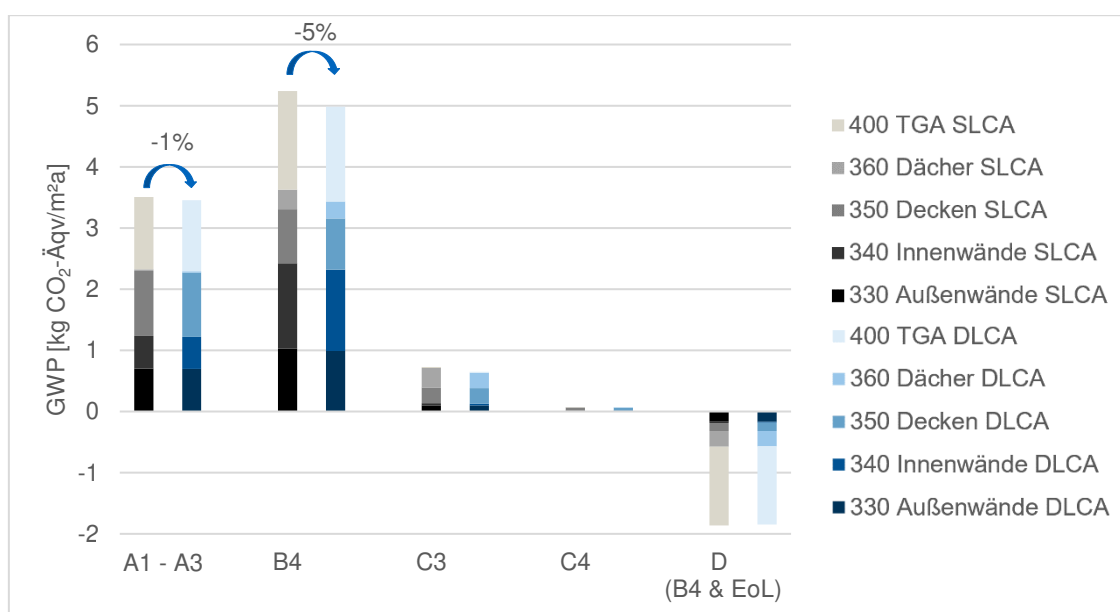


Abb. 43: Vergleich des spezifischen GWPs von SLCA und DLCA in der KNB-Variante

Die in Abb. 36 und Abb. 38 aufgezeigten Anteile der Kostengruppen oder Baustoffe am GWP ändern sich in der KNB-Variante nur marginal. (vgl. Anhang 7) Betrachtet man das GWP je Bauteilfläche (Abb. 44) ist auch eine relativ gleichmäßige GWP-Minderung über alle Bauteile der KNB-Variante zu sehen. Größere Reduktionen dagegen sind in Bauteilen zu erkennen, die nachwachsende Rohstoffe beinhalten. Emissionen, die durch nachwachsende Rohstoffe über den Lebensweg auftreten, werden hauptsächlich in der Phase C3 durch deren Verbrennung frei. In dieser Phase liegt der Anteil am GWP durch die Wärmezufuhr für den Prozess der kontrollierten Verbrennung bei ca. 25 % (siehe Anhang 8). Da das EoL der Baustoffe i. d. R. erst zu einem späteren Zeitpunkt eintritt und die Wärmeversorgung somit bereits dekarbonisiert ist, fällt die GWP-Reduktion durch die Implementierung der DLCA bei nachwachsenden Rohstoffen stärker aus als bei nicht-nachwachsenden Rohstoffen. Vor allem bei Satteldach, Dachterrasse und Außenwand in der KFK-Variante sind diese Auswirkungen deutlich erkennbar.

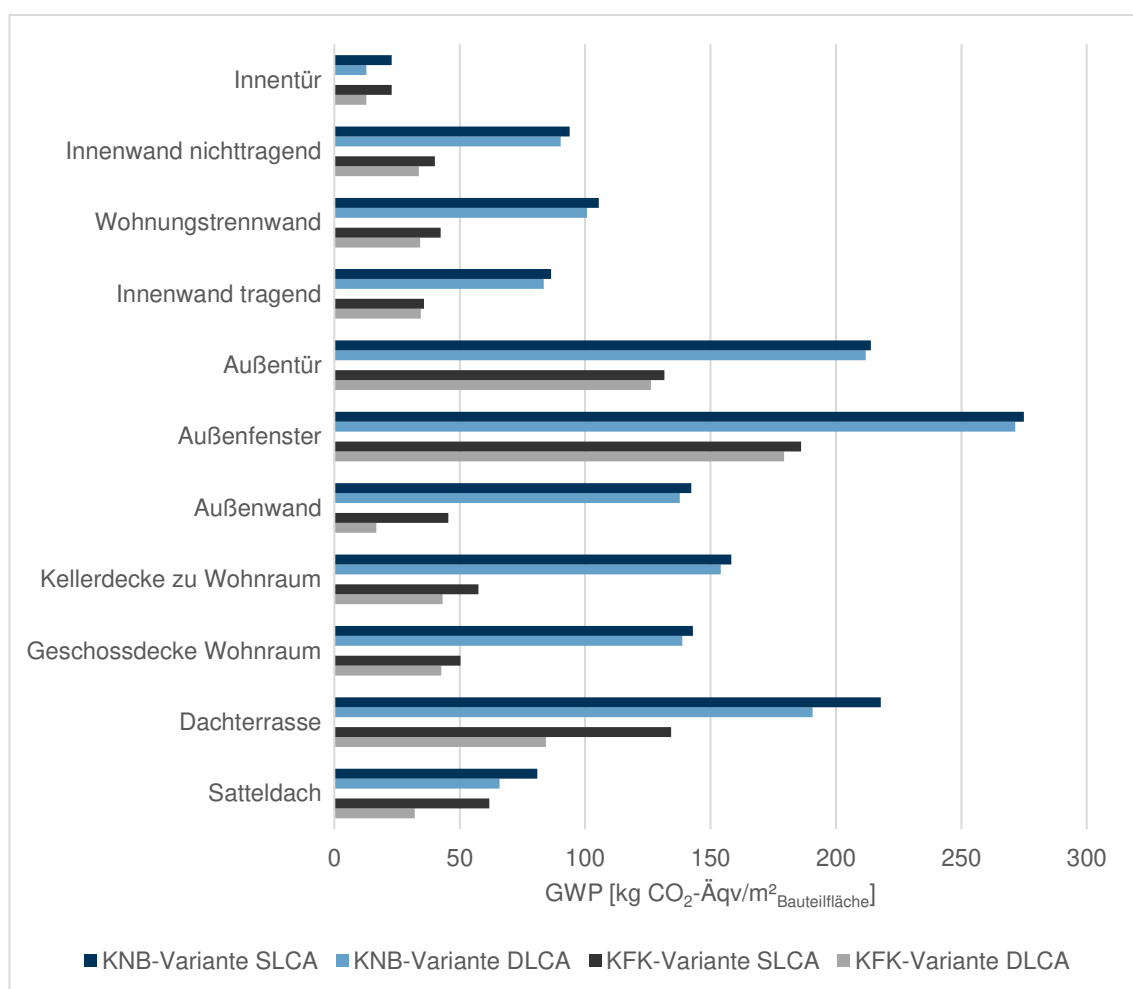


Abb. 44: GWP je m² Bauteilfläche (beide Varianten, SLCA und DLCA)

Durch den hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen in der KFK-Variante (vgl. Abb. 35) fällt die Minderung des GWPs durch die Implementierung der DLCA in dieser Variante deutlich stärker aus als in der KNB-Variante. Statt 6,0 kg CO₂-Äqv/m²a in der SLCA ergeben sich für die grauen Emissionen nun nur noch 5,3 kg CO₂-Äqv/m²a, was einer Reduktion von 13 % entspricht. Betrachtet man außerdem die Dekarbonisierung des Stromnetzes während der Nutzungsphase, werden hier nur noch 0,2 kg CO₂-Äqv/m²a statt 1,1 kg CO₂-Äqv/m²a emittiert (vgl. Abb. 45). Dies kommt einer Abnahme von 77 % gleich. In Summe werden also über den Lebensweg nur noch 5,5 kg CO₂-Äqv/m²a emittiert, was 22 % geringere Emissionen als in der statisch berechneten Variante bedeutet.

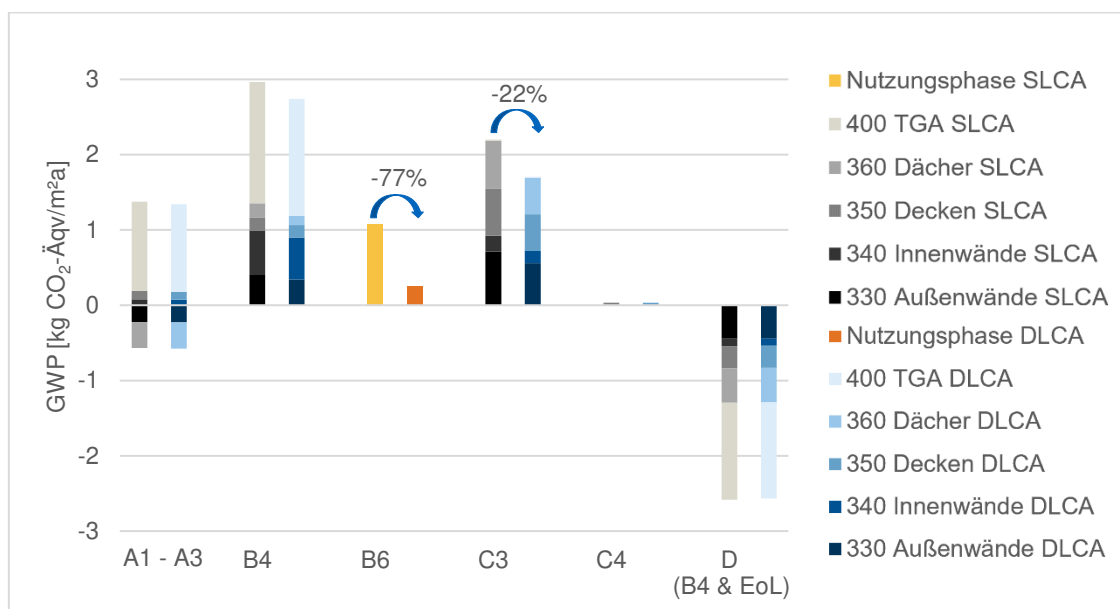


Abb. 45: Vergleich des spezifischen GWPs von SLCA und DLCA in der KFK-Variante

6.3. Sensitivitätsanalyse der DLCA-Ergebnisse und -Methodik

In diesem Kapitel wird die Sensitivität der Ergebnisse auf die hinterlegte Datenbasis und die verwendete Methodik untersucht. In Kapitel 6.3.1 wird dargestellt, inwieweit die Ergebnisse der DLCA auf Änderungen im hinterlegten Strom- und Wärmeszenario und in den verwendeten Ecoinvent-Datensätzen reagieren. Kapitel 6.3.2 dagegen zeigt auf, welchen Einfluss verschiedene Herangehensweisen aufweisen.

6.3.1. Sensitivität auf verwendete Datenbasis

In dieser Arbeit wird die Dekarbonisierung der Energieversorgung anhand der deutschen Klimaziele angenommen. D. h. es liegt die Annahme zugrunde, dass die

durchaus ambitionierten Ziele im Klimaschutzgesetz 2021 zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden. Nun stellt sich die Frage, welchen Einfluss ein weniger ambitionierter Minderungspfad auf die Ergebnisse der DLCA hätte bzw. wie sensibel die Ergebnisse auf die hinterlegten Szenarien reagieren. Dazu werden die veralteten Klimaziele aus 2016 (Klimaschutzplan (KSP) 2050) herangezogen. Diese sehen eine Reduktion der Treibhausgase von 55 % bis 2030, 70 % bis 2040 und 80 % - 95 % bis 2050 vor. (Albert et al., 2016, S. 7, 13) Für die Sensitivitätsanalyse wird die konservative Annahme einer Minderung von 80 % bis 2050 angesetzt. In Abb. 46 sind in Blau diejenigen Emissionen abgebildet, welche im Szenario *Klimaschutzgesetz 2021* entstehen. Durch die höheren angesetzten Emissionsfaktoren im Szenario *Klimaschutzplan 2050* entstehen demzufolge höhere Emissionen über den Lebensweg des Gebäudes. Ob die zusätzlichen Treibhausgase dem hinterlegten Szenario für Wärme oder Strom zuzuordnen sind, ist in Abb. 46 durch die farbliche Markierung zu erkennen.

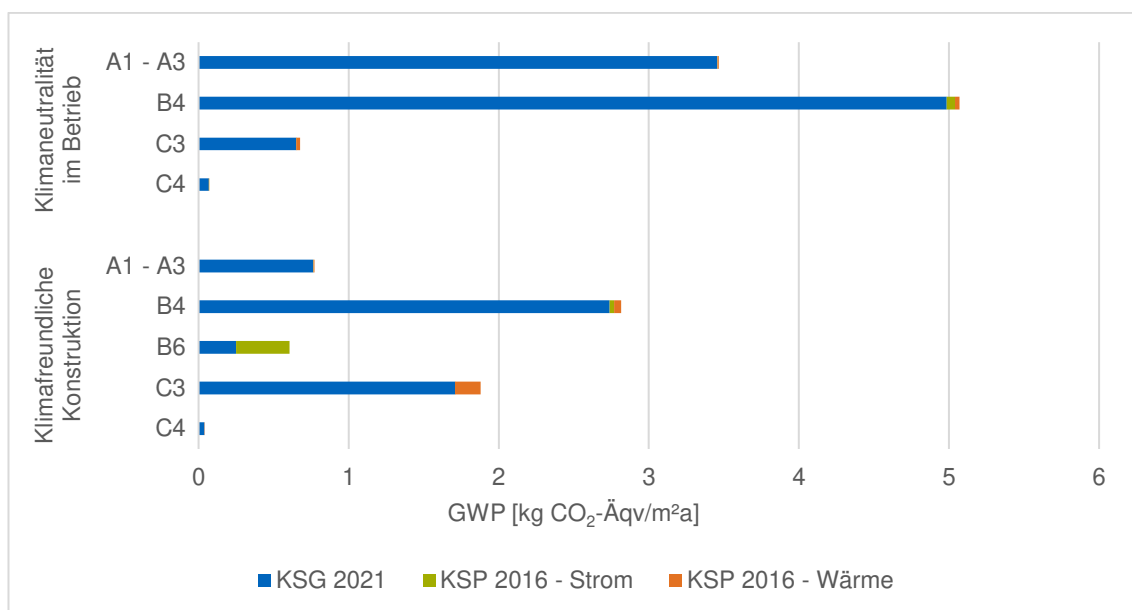


Abb. 46: Sensitivität der DLCA auf hinterlegte Szenarien der Strom- und Wärmeversorgung

Die Grafik zeigt, dass die KFK-Variante generell stärker auf die hinterlegten Szenarien reagiert als die KNB-Variante. Dies liegt einerseits daran, dass die Anteile durch die Energieversorgung am GWP insgesamt etwas höher liegen (vgl. Abb. 42) und andererseits fällt der Großteil der Emissionen in der KFK-Variante zu einem späteren Zeitpunkt an, wo die Dekarbonisierung der Energieversorgung im Vergleich zum Anfangszeitpunkt bereits fortgeschritten ist. Auffällig ist außerdem die hohe Sensibilität der Phase B6 auf die Entwicklung des Strommixes, da die hier entstehenden Emissionen alleinig durch den Emissionsfaktor zustande kommen.

Der hohe Einfluss der Wärme in Phase C3 bei den nachwachsenden Rohstoffen (vgl. Kapitel 6.2) ist zudem deutlich erkennbar. Für die Abfallverwertung C3 wird für alle nachwachsenden Rohstoffe derselbe Datensatz zur kontrollierten Verbrennung von Holz angesetzt, da kaum bauproduktsspezifische Datensätze vorhanden sind und dieser Ecoinvent-Datensatz dem realen Prozess somit am nächsten kommt. Im ausgewählten Datensatz trägt die Wärmeversorgung zu ca. 25 % zum GWP bei. Wird stattdessen ein anderer Datensatz beispielsweise mit unkontrollierter Verbrennung ohne jegliche Schadstoffkontrolle oder Nachbehandlung der Schlacke als Datensatz ausgewählt (vgl. Anhang 8), so wird keine Wärmeversorgung mehr benötigt und sie hat keinen Anteil am GWP. Diese Änderung des Hintergrunddatensatzes würde in der KFK-Variante statt einer Minderung des GWPs um 22 % im Modul C3 von statischer zu dynamischer Berechnungsweise nur noch eine Reduktion von 0,4 % der Emissionen hervorrufen. Dies zeigt die hohe Sensitivität der DLCA-Ergebnisse auf die Prozentangaben in den gewählten Ecoinvent-Datensätzen, besonders wenn diese Relationen auf hohe Emissionsmengen angewandt werden, welche weit in der Zukunft liegen. Für künftige Studien wäre folglich eine verlässlichere Datenbasis und Erweiterung der Datenbanken auf spezifische Einzelprozesse wünschenswert.

6.3.2. Sensitivität auf methodisches Vorgehen

Die gewählte Vorgehensweise (vgl. Kapitel 3) basiert darauf, dass relative Informationen, d. h. Prozentsätze, von der Ecoinvent auf die statischen Ökobaudat-Datensätze übertragen werden, um diese zu dynamisieren. Die Ecoinvent liefert aber auch absolute Informationen und zeigt auf, wie viel Energieinput für die Verarbeitung einer Baustoffeinheit benötigt wird (vgl. Abb. 1). Der Energiebedarf in kWh oder MJ kann schlussendlich mit einem Emissionsfaktor belegt werden und so entsteht eine alternative Herangehensweise der Dynamisierung. Fällt die Energieversorgung im GWP kaum ins Gewicht, dann sind auch die Auswirkungen der gewählten Methodik kaum merklich (vgl. Anhang 9). Vergleicht man beide Methodiken bei hohem Einfluss der Energieversorgung, so lässt sich bei der Übertragung eines absoluten Energieinputs eine hohe Sensitivität der Ergebnisse gegenüber dem Verhältnis zwischen absolutem Ecoinvent- und Ökobaudat-GWP feststellen. Obwohl beide Datensätze dasselbe Referenzprodukt beschreiben, unterscheiden sich ggf. die Rahmenbedingungen und dadurch die resultierenden Umweltwirkungen. Gibt die Ecoinvent ein wesentlich höheres Gesamt-GWP je Baustoffeinheit an als die Ökobaudat und der absolute Energiebedarf wird hiervon übertragen, ist der resultierende Einfluss des Strommixes entsprechend hoch. Gibt die

Ecoinvent hingegen ein geringeres GWP als die Ökobaudat an, ist der entstehende GWP-Anteil durch den Strommix entsprechend geringer. Diese hohe Sensitivität spricht eindeutig für die Verwendung der Prozent-Methode, welche letztendlich in dieser Studie auch angewendet wird. Der deutliche Vorteil der Energieinput-Methode ist allerdings, dass diese Vorgehensweise auch auf negative GWP-Werte von nachwachsenden Rohstoffen anwendbar wäre. Insgesamt könnte die Implementierung der Energieinput-Methodik die Ergebnisse durchaus verändern und es ist dabei nicht abschätzbar in welche Richtung.

Eine weitere alternative Methodik ist der zusätzliche Einbezug der Strom- und Wärmeversorgung in den Hintergrunddatensätzen. Wie zuvor erörtert (vgl. Kapitel 6.1.1) ist dies in dieser Studie nicht berücksichtigt. Nach Potrč Obrecht et al. (2021, S. 844) führt eine Vernachlässigung nicht zu realistischen Ergebnissen, da die Energieversorgung in den Hintergrundprozessen wesentlich zu der Endbilanz beiträgt. So wird für die Sensitivitätsanalyse ein beispielhafter Datensatz herausgegriffen, für den zusätzlich die Hintergrundprozesse berücksichtigt werden. Dies geschieht anhand der Produktion von Dreifachverglasung als Hauptprozess mit zusätzlicher Untersuchung von drei Ebenen der Hintergrundprozesse (vgl. Anhang 9). Da sich der Aufwand mit jedem Teilprozess und jeder Ebene exponentiell erhöht, werden ab der zweiten Ebene nur noch jene Hintergrundprozesse mit einem Einfluss größer als 1 % am GWP in die Betrachtung mit einbezogen. Statt einem anfänglichen Einfluss von ca. 3 % ergibt sich schließlich ein Anteil von ca. 26 % für die Stromversorgung. Damit wird deren Wirkung durch die gewählte Vorgehensweise in diesem Fall um den Faktor 8 unterschätzt. Für die Wärmeversorgung ergeben sich statt anfänglichen 0 % nun 2,28 %, wobei sich dieser Prozentsatz bei der Betrachtung weiterer Ebenen noch deutlich erhöhen würde. Folglich wäre eine Integration aller Hintergrundprozesse in die Studie durchaus sinnvoll und würde das GWP beider Varianten noch weiter vermindern. Eine Umsetzung dessen ist aber mit der gegebenen Datenbankstruktur mit enorm hohem Aufwand verbunden. Die Datensätze sind stark verwoben und die Inputs der Energieversorgung oftmals erst in späteren Ebenen zu finden.

6.4. Interpretation der DLCA-Ergebnisse

Die Handlungsempfehlung, dass die Variante *Klimafreundliche Konstruktion* zu favorisieren ist, bleibt auch in der dynamischen Berechnung bestehen. Für die KNB-Variante wird ein Gesamt-GWP von 9,2 kg CO₂-Äqv/m²a, für die KFK-Variante von 5,5 kg CO₂-

Äqv/m²a ermittelt. Damit werden durch die klimafreundliche Bauweise 40 % der Treibhausgase eingespart. Mit Einbezug von Modul D ergeben sich 7,3 kg CO₂-Äqv/m²a bzw. 2,9 kg CO₂-Äqv/m²a für die KNB- bzw. KFK-Variante. Von der statischen zur dynamischen Betrachtung ist in der KNB-Variante eine Reduktion des GWPs um 4 % zu vermerken und in der KFK-Variante um 22 %, wobei hiervon ca. die Hälfte auf die GWP-Minderung im Modul B6 zurückzuführen ist. Die Dekarbonisierung der Stromversorgung wird in der Nutzungsphase vollständig weitergegeben und nicht wie bei den grauen Emissionen nur anteilig übernommen. So fallen im Vergleich zu der statischen Berechnungsmethodik die betriebsbedingten Emissionen in der KFK-Variante nur noch geringfügig ins Gewicht. Dies zeigt einmal mehr, dass ein Fokus auf einen klimaneutralen Betrieb ohne Einbezug der grauen Emissionen in Anbetracht der künftigen Entwicklungen nicht sinnvoll ist. Zusätzlich dazu zeigt sich auch die hohe Sensitivität nachwachsender Rohstoffe auf die künftige Entwicklung der Wärmeversorgung deutlich in den vergleichsweise geringen Emissionen der KFK-Variante. Der Großteil der Emissionen in der KFK-Variante fällt zu einem späteren Zeitpunkt an, wodurch die Dekarbonisierung sich stärker bemerkbar macht als in der KNB-Variante, in der die meisten Emissionen durch die Bauphase entstehen. Aus diesen Gründen fällt die Reduktion des GWPs durch die Implementierung der DLCA in der KFK-Variante deutlich stärker aus als in der KNB-Variante. Ein pauschaler Wert oder Prozentsatz, den die dynamische Betrachtung der Energieversorgung am gesamten GWP schlussendlich ausmacht, kann allerdings nicht angegeben werden. Wie sehr die dynamischen Parameter die Klimawirkung eines Gebäudes beeinflussen, ist äußerst abhängig von der Materialwahl, dem Zeitpunkt der Emissionen, wie auch der für die Studie gewählten Datenbasis. Außerdem muss beachtet werden, dass weder die Entwicklung von Strom und Wärme bei der Herstellung nachwachsender Rohstoffe mitberücksichtigt werden kann, noch die künftige Entwicklung von Modul D oder die Dekarbonisierung der Hintergrundprozesse (vgl. Kapitel 6.1.1). Die GWP-Reduktion beider Varianten durch die DLCA würde damit noch stärker ausfallen und die aktuellen Ergebnisse entsprechen daher einem konservativen Szenario. Damit kann die Hypothese aus Kapitel 2 zumindest qualitativ bestätigt werden. Obwohl gewisse Unsicherheiten durch die Implementierung der DLCA entstehen, führt eine Nichtberücksichtigung der dynamischen Parameter besonders in der Nutzungsphase, aber auch in den grauen Emissionen zu großen Unzuverlässigkeiten in den Ergebnissen und erschwert somit ihre Einordnung in den übergeordneten Kontext. Eine Erweiterung der Datenbanken auf eine hinreichende und verlässliche Datenbasis würde bei der Erzielung zuverlässiger Ergebnisse in jedem Fall helfen.

7. Einordnung der Ergebnisse in den Kontext der internationalen Klimaziele von Paris

Durch die Ökobilanzierung in den vorangegangenen Kapiteln werden die Umweltwirkungen entstehend durch die Sanierung des DAV-Gebäudes abgeschätzt und es kann eine eindeutige Empfehlung bzgl. der Varianten gegeben werden. Ob diese Maßnahmen aber nachhaltig genug sind, um den internationalen Klimazielen gerecht zu werden, kann bisher nicht abgeschätzt werden. Dazu fehlt bislang die Größeneinordnung in den politischen Kontext, welche in diesem Kapitel erfolgt.

Grundlage dafür bilden die im IPCC-Bericht 2021 vorgegebenen Emissionsbudgets. Je nach Grad-Ziel und Wahrscheinlichkeit der Erreichung dieses Grad-Ziels werden globale Restbudgets für Treibhausgasemissionsmengen vorgegeben, welche bis zum Zeitpunkt der Netto-Nullmissionen noch bestehen (vgl. Anhang 10). Je größer die Sicherheit, mit der ein Grad-Ziel erreicht wird, desto niedriger ist das verbleibende CO₂-Budget. Für die Erreichung des 1,5 °C-Ziels mit einer Wahrscheinlichkeit von 83 % bleiben beispielsweise ab 2020 weltweit noch 300 Gt CO₂-Äqv. (Masson-Delmotte et al., 2021, S. 29) Das globale CO₂-Budget wird mithilfe der mittleren Weltbevölkerung von 9,17 Milliarden (Jahr 2023: Population Division [UN DESA], 2022b; Jahr 2073: UN DESA, 2022a) und der mittleren deutschen Bevölkerungszahl von 83,45 Millionen (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2023; Destatis, 2022) auf ein nationales CO₂-Budget heruntergebrochen. Da dieses Budget ab dem Jahr 2020 angesetzt ist und seit diesem Zeitpunkt weitere Treibhausgase emittiert wurden, reduziert sich das nationale Restbudget um die bereits getätigten Emissionen (UBA, 2023). Möchte man z. B. das 1,5 °C-Ziel mit einer Sicherheit von 83 % erreichen, so wäre das nationale Restbudget seit 2020 bereits zu 82 % ausgeschöpft worden und es bleiben ab 2023 für Deutschland noch ca. 0,5 Gt CO₂-Äqv. (vgl. Anhang 10) Geht man davon aus, dass auf Nutzerstrom und Wohnnutzung ca. 25 % der Emissionen pro Kopf anfallen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV], 2022) und einer Person im DAV-Gebäude inkl. KG ca. 49 m² zur Verfügung stehen, so lassen sich Paris-kompatible Emissionsgrenzwerte für das Gebäude ermitteln. Bezogen auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren sind diese schließlich vergleichbar mit den Ergebnissen der Ökobilanz. (vgl. Tab. 4)

Tab. 4: Paris-kompatible Emissionsgrenzwerte [kg CO₂-Äqv/m²a] für die Wohnnutzung im DAV-Gebäude

Wahrscheinlichkeit der Erreichung des Grad-Ziels \ Grad-Ziel	50 %	67 %	83 %
1,5 °C	2,8	1,7	0,6
1,7 °C	6,7	5,0	3,4
2,0 °C	12,2	10,0	7,2

In der dynamischen Ökobilanz ergeben sich über den Lebensweg Emissionen von 9,2 kg CO₂-Äqv/m²a in der KNB-Variante und 5,5 kg CO₂-Äqv/m²a in der KFK-Variante. (vgl. Kapitel 6). Stellt man diese Ergebnisse der DLCA den Richtwerten zur Einhaltung der Pariser Klimaziele gegenüber, stößt selbst die KFK-Variante über den Lebensweg zu viele Emissionen aus, als dass das 1,5 °C-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit größer als 50 % gehalten werden könnte. Entscheidet sich der DAV für diese Variante, stünde die Sanierungsmaßnahme zumindest im Einklang mit einer Begrenzung der Erderwärmung auf 1,7 °C mit mittelmäßiger Sicherheit. Die KNB-Variante dagegen ist lediglich kompatibel zu dem 2 °C-Ziel mit einer Sicherheit von 67 %. Auch die Einberechnung von Modul D in die Ergebnisse ändert nichts an der übergeordneten Einordnung, sondern erhöht lediglich die Wahrscheinlichkeit zur Erreichung des Grad-Ziels. Somit wird die Hypothese der Konformität mit dem 1,5 °C-Ziel des Pariser Klimaabkommens für beide DLCA-Varianten widerlegt. In Anbetracht der Ergebnisse wird klar, dass die Einhaltung der nationalen Klimaziele nicht ebenso die Einhaltung internationaler Klimaziele bedingt. Falls der Bauherr die Sanierungsmaßnahme kompatibel zu den Pariser Klimazielen planen und bauen möchte, müsste er folglich noch weitere Ambitionen und Anstrengungen unternehmen. Das Ziel der Bundesregierung zur Erreichung eines klimaneutral betriebenen Gebäudebestandes bis 2045 ist jedenfalls noch zu niedrig gesteckt und auch der DGNB-Grenzwert für eine klimafreundliche Konstruktion ist nicht konform zu den Pariser Klimazielen. Die Ziele der Bundesregierung sollten daher z. B. auf einen klimaneutral erstellten Gebäudebestand gehoben werden, sodass die künftigen Baumaßnahmen in Einklang mit den internationalen Klimaschutzzielen stehen. In jedem Fall sollten die grauen Emissionen ebenso wie bisher die betriebsbedingten Emissionen in die Vorgaben durch die Politik miteinbezogen werden und Richtwerte oder Transformationspfade auch für Gebäudeökobilanzen vorgegeben werden.

8. Fazit

Das Ziel der Masterarbeit ist der ökobilanzielle Vergleich zweier Sanierungsvarianten bezogen auf ihre Klimawirkung anhand eines beispielhaften Wohngebäudes des DAVs. Dem Bauherrn wird damit eine klare Handlungsempfehlung an die Hand gegeben, ob der Fokus auf der Verwendung klimafreundlicher Baustoffe oder auf Klimaneutralität während der Betriebsphase liegen soll. Des Weiteren wird der Einfluss der künftigen Dekarbonisierung der Energieversorgung in materialgebundenen und betriebsbedingten Emissionen quantifiziert, indem eine statische Ökobilanzierung mit einer dynamischen LCA verglichen wird.

Mit den ausgewählten Bauteilaufbauten und dem resultierenden Energiebedarf kann eine Ökobilanz für beide Sanierungsvarianten berechnet werden. In der SLCA ergibt sich ein GWP von 9,5 kg CO₂-Äqv/m²a für die KNB-Variante und 7,1 kg CO₂-Äqv/m²a für die KFK-Variante, wobei 6,0 kg CO₂-Äqv/m²a davon auf die Konstruktion und 1,1 kg CO₂-Äqv/m²a auf die Nutzungsphase entfallen. Die höchsten spezifischen Emissionen je m² Bauteilfläche fallen in beiden Varianten bei den Fenstern an. Die Emissionen werden aber durch die vergleichsweise geringe Fläche etwas relativiert. Bezieht man die Flächenverteilung mit ein, zeigt sich die Farbe als der Baustoff, der in beiden Varianten mit Abstand das höchste GWP über den Lebensweg besitzt. Dies ist unter anderem auch auf die hohe Austauschhäufigkeit zurückzuführen. Auch Putzsysteme, Estrich und Bodenbelag haben einen sichtbaren Einfluss in der KNB-Variante und stellen damit mögliche Optimierungsoptionen hinsichtlich der Emissionsintensität dar. Insgesamt werden in der KFK-Variante bei statischer Berechnung ca. 26 % weniger Treibhausgase frei als in der KNB-Variante, wodurch eine klare Handlungsempfehlung gegeben werden kann.

Im nächsten Schritt werden die Emissionen, welche durch die Energieversorgung mit Strom und Wärme entstehen, als über die Zeit variabel angesetzt. Szenarien für deren Entwicklung werden anhand der deutschen Treibhausgasminderungsziele festgesetzt und hinter die statischen Daten gelegt, um diese zu dynamisieren. In der Herstellungsphase der verwendeten Bauprodukte liegt der durchschnittliche Anteil von Strom und Wärme in Summe bei bis zu 14 %, wobei die Emissionen durch die Stromversorgung den größeren Beitrag haben. In der Abfallverwertung fallen vor allem nachwachsende Rohstoffe mit einem hohen Einfluss der Wärmeversorgung auf, während in der

Abfallbeseitigung weder Strom noch Wärme zum Tragen kommen. Mit diesen Hintergrunddaten ergibt sich in der KNB-Variante für die dynamische Berechnung ein GWP von 9,2 kg CO₂-Äqv/m²a, was einer Reduktion der Emissionen von 4 % gegenüber der statischen Berechnung entspricht. Zurückzuführen ist diese Minderung hauptsächlich auf die künftig weniger CO₂-intensive Herstellung von Bauprodukten, welche sich beim Austausch von Komponenten bemerkbar macht. Für die KFK-Variante ergeben sich in der DLCA noch 5,5 kg CO₂-Äqv/m²a. Damit werden im Vergleich zu der KNB-Variante 40 % weniger Emissionen ausgestoßen. Vom Gesamt-GWP fallen 5,3 kg CO₂-Äqv/m²a auf die Konstruktion und nur noch 0,2 kg CO₂-Äqv/m²a auf die Stromversorgung während der Nutzungsphase. Insgesamt kommt dies einer Reduktion um 22 % gegenüber der SLCA gleich. Diese deutlich stärkere Minderung im Vergleich zur KNB-Variante ist zu großem Teil auf die Dekarbonisierung der Stromversorgung in der Nutzungsphase zurückzuführen, wo jegliche Emissionen alleinig durch den Emissionsfaktor des Strommixes bestimmt werden. Außerdem fällt in der KFK-Variante der Großteil der Emissionen durch die überwiegend verwendeten nachwachsenden Rohstoffe erst in der Phase C3 an. Bei diesen besitzt die Wärmeversorgung einen hohen Anteil am GWP. Wegen der vorangeschrittenen Dekarbonisierung zum EoL-Zeitpunkt und dem hohen Einfluss der Wärme am GWP fallen die Ergebnisse in der KFK-Variante zusätzlich besser aus. Mit diesen Ergebnissen kann die Forschungsfrage zum Einfluss der dynamischen Emissionsfaktoren beantwortet werden. Die Handlungsempfehlung zur Favorisierung der KFK-Variante bleibt auch in der DLCA bestehen bzw. wird sogar weiter verstärkt.

Grundsätzlich werden in der Studie aber auch viele dynamische Parameter vernachlässigt oder Annäherungen getroffen, welche Unschärfen in den Ergebnissen hervorrufen. Gründe dafür sind unter anderem der Mangel an relevanten und konsistenten Daten und die hohe Komplexität der Durchführung der DLCA, welche enormen Aufwand zur Datenerfassung und -analyse nach sich zieht. Auch das methodische Vorgehen weist gewisse Defizite auf, wie z. B. die fehlende Möglichkeit zur dynamischen Betrachtung von Herstellungsprozessen nachwachsender Rohstoffe. Der Einfluss der dynamischen Parameter an der Klimawirkung eines Gebäudes ist hochgradig abhängig von der Materialwahl, dem Zeitpunkt der Emissionen, wie auch der für die Studie gewählten Datenbasis. Demnach müssen noch einige weitere Studien durchgeführt werden, um je Bauweise einen pauschalen Abschlag einschätzen und gewisse bestehende Unsicherheiten eliminieren zu können. Generell kann durch die getätigten Vernachlässigungen aber von einem konservativ berechneten Szenario ausgegangen werden und die Emissionen dürften dadurch ggf. noch geringer ausfallen als hier ermittelt. Eine Nichtberücksichti-

gung der dynamischen Entwicklung der Energieversorgung führt jedenfalls zu einer Überschätzung der Treibhausgasemissionen. Somit ist die Durchführung einer DLCA mindestens für die Nutzungsphase, wo eine Umsetzung leicht realisierbar ist, aber auch für die anderen Lebenswegphasen zu empfehlen. Eine Erweiterung der Datenbanken auf eine verlässliche und verwertbare Datenbasis, wie z. B. die Bereitstellung von Unit Process Datensätzen, würde die Ausführung einer DLCA dabei erleichtern und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöhen.

Schlussendlich werden die Ergebnisse der DLCA in den Kontext der internationalen Klimaziele des Pariser Abkommens gesetzt und damit die dritte Forschungsfrage beantwortet. Weder KNB- noch KFK-Variante stehen dabei im Einklang mit der Erreichung des 1,5 °C-Ziels. Während die KNB-Variante lediglich konform zum 2 °C-Ziel ist, kann die KFK-Variante zumindest das 1,7 °C-Ziel mit mittelmäßiger Sicherheit einhalten. Wenn die internationalen Ziele allerdings erreicht werden sollen, müsste die Bundesregierung ihre nationalen Ziele bzgl. des Gebäudebestandes höher stecken und den Fokus mehr auf graue Emissionen und Kreislaufwirtschaft in der Baustoffbranche lenken.

9. Ausblick

Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Implementierung einer DLCA im Vergleich zur statischen LCA durchaus große Veränderungen in den Ergebnissen hervorrufen kann. Vor dem Hintergrund der bestehenden Unsicherheiten sollten die Ergebnisse jedoch nur sehr vorsichtig auf andere Gebäude oder LCA-Untersuchungen übertragen werden. Es besteht weiterhin ein großes Potenzial zur Analyse der verschiedenen dynamischen Parameter bzgl. ihrer künftigen Entwicklung und der Auswirkungen dieser in den Umweltwirkungen. Einige dynamische Variablen sind bisher noch unvollständig und ungenügend erforscht. Außerdem werden die Parameter meist unabhängig voneinander in dynamische Bewertungen miteinbezogen. Die Wechselwirkungen aber, welche sich zwischen den dynamischen Variablen in Zukunft ergeben, müssen ebenso in Betracht gezogen werden, um realistische Ergebnisse abzubilden. Alles in allem ist die DLCA derzeit noch ein umfassendes und interdisziplinäres Forschungsthema, das sich in einem frühen Stadium befindet. Daher müssen noch zahlreiche Studien durchgeführt werden, um den Wissensstand zur Thematik zu erweitern und zu verbessern. (Su et al., 2021, S. 26211)

Die entstehende Komplexität der DLCA erschwert eine praxistaugliche Durchführung. Um die Erkenntnisse aus der Forschung auf die Praxis anwenden zu können, muss die Umsetzung der DLCA deutlich erleichtert werden. Die begrenzte Datenverfügbarkeit und Schwierigkeit der Datenerfassung stellt bisher ein sehr großes Hindernis dar. Ein Lösungsansatz dafür wäre die Einführung dynamischer Datenbanken. Bestehende Datenbanken müssten demzufolge rapide umstrukturiert werden, sodass dynamische Daten in der praktischen Anwendung leicht zugänglich sind. Diese sollten dann wahrscheinliche Szenarien, aber auch potenzielle Schwankungsbreiten abbilden. Dynamische Datenbanken würden in der Umsetzung jedoch viel Zeit und Aufwand ersparen und so die Verwendung der DLCA vorantreiben. (Su et al., 2021, S. 26211)

Literaturverzeichnis

- Albert, R., Angrick, M., Bade, M., Balzer, F., Bertram, A., Bilharz, M. et al. (2016, April). *Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung. Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes* (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Position).
- Asdrubali, F., Baggio, P., Prada, A., Grazieschi, G. & Guattari, C. (2020). Dynamic life cycle assessment modelling of a NZEB building. *Energy*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116489>
- Bacher, V., Berger, M., Henßler, M., Kirchner, M., Leiser, S., Mohr, L. et al. (2016). *Messung von Ressourceneffizienz mit der ESSENZ-Methode. Integrierte Methode zur ganzheitlichen Bewertung* (1. Aufl. 2016). Berlin: Springer.
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.a). *Außenwände nachträglich dämmen*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/modernisierung/aussenwaende-nachtraeglich-daemmen-152130>
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.b). *Dachziegel*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/d/dachziegel-653771>
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.c). *Estrichart: Zementestrich CT*. Verfügbar unter: https://www.baunetzwissen.de/boden/fachwissen/_estriche/estrichart-zementestrich-ct-988085
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.d). *Fenster*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/f/fenster-1523583>
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.e). *Fugenband*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/f/fugenband-48315>
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.f). *Funktion und Eigenschaften der Dampfbremse*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/geneigtes-dach/fachwissen/dampfbremse/funktion-und-eigenschaften-der-dampfbremse-158447>
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.g). *Holzfasern*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/holzfasern-152200>
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.h). *Mineralwolle*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/mineralwolle-152218>
- Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.i). *Das richtige Zusammenspiel – Schicht für Schicht*. Verfügbar unter:

<https://www.baunetzwissen.de/flachdach/tipps/publikationen/das-richtige-zusammenspiel--schicht-fuer-schicht-4085185>

Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.j). *Treibhauspotenzial*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/t/treibhauspotenzial-6305134>

Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.k). *Unterdeckplatte*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/u/unterdeckplatte-49183>

Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.l). *Vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF)*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/fassade/fachwissen/fassadenarten/vorgehaengte-hinterlueftete-fassaden-vhf-2341005>

Baunetz Wissen - Online-Lexikon des Architekturmagazin BauNetz (BauNetz, Hrsg.). (o. J.m). *Zwischensparrendämmung*. Verfügbar unter: <https://www.baunetzwissen.de/geneigtes-dach/fachwissen/daemmung-lueftung/zwischenparrendaemmung-158441>

Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. Bayerische Technische Baubestimmungen. BayTB.

Braune, A., Klemm, S., Lemaitre, C., Kreißig, J., Geiselman, D., von Gemmingen, U. et al. (2020, März). *Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte* (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., Hrsg.).

Braune, A., Ruiz Durán, C. & Gantner, J. (2018, Februar). *Leitfaden zum Einsatz der Ökobilanzierung* (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., Hrsg.).

Breton, C., Blanchet, P., Amor, B., Beauregard, R. & Chang, W.-S. (2018). Assessing the Climate Change Impacts of Biogenic Carbon in Buildings: A Critical Review of Two Main Dynamic Approaches. *Sustainability*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/su10062020>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.). (2022, Februar). *Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck pro Kopf in Deutschland*. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/media/kohlenstoffdioxid-fussabdruck-pro-kopf-in-deutschland>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.). (o. J.a). *Abkommen von Paris*. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.). (o. J.b). *Glossar Energiewende. Emissionsfaktor*. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Glossar-Energiewende/Glossar_Formular.html?resourceId=dc77c18f-d6bb-434e-984e-c97acdb51ae7&input_=3f6a3c76-66e6-42d0-846d-504b1cfa8c25&pageLocale=de&titlePrefix=E#form-dc77c18f-d6bb-434e-984e-c97acdb51ae7

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.). (2022a). *Energiedaten: Gesamtausgabe*. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.). (2022b). *Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM)*. Verfügbar unter: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/de/amtliche-veroeffentlichung?3>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.). (o. J.a). *Ökobaudat*. Verfügbar unter: <https://www.oekobaudat.de/>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.). (o. J.b). *Ökobaudat gemäß EN 15804+A1*. Verfügbar unter: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db1.html#bereich1
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.). (2017, Februar). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. Verfügbar unter: <https://www.nachhaltiges-bauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.). (2023, März). *Anlage 3 zum Handbuch des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäudes. Gebäudeanforderungen*. Berlin.
- Bundesregierung (Hrsg.). (2022, November). *Klimaschutzgesetz. Generationenvertrag für das Klima*. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>
- Carbon Risk Real Estate Monitor (Hrsg.). (2020, September). *Stranding Risk. 1st Panel: Climate change impact on real estate - uncertainty and solutions*. Verfügbar unter: https://www.crrem.eu/wp-content/uploads/2020/09/Panel_1d_Lafuente.pdf
- Co2online (Hrsg.). (o. J.). *Glossar. Wärmedurchgangskoeffizient*. Verfügbar unter: <https://www.co2online.de/glossar/de/default/definition/waermedurchgangskoeffizient/>
- Collinge, W. O., Landis, A. E., Jones, A. K., Schaefer, L. A. & Bilec, M. M. (2013). Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 538–552. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0528-2>
- Dataholz.eu (Hrsg.). (o. J.). *Bauteil geneigtes Dach sdrhzi03a. geneigtes Dach Holzrahmen/Holztafel, hinterlüftet/belüftet, mit Installationsebene, auf Lattung*. Verfügbar unter: https://www.dataholz.eu/nc/bauteile/daecher/detail/kz/sdrhzi03a.htm?tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileGueltigkeitsbereich%5D=&tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileKlasse%5D=geneigtes%20Dach&tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileReiVonInnen%5D=&tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileReiVonAussen%5D=&tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileRw%5D=&tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileLn%5D=&tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileU%5D=u15&tx_nudataholz_nudataholz%5BbauteileQueryParamValues%5D=da_k_1

- De Wolf, C., Pomponi, F. & Moncaster, A. (2017). Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *Energy and Buildings*, 140, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.075>
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). (2016, Dezember). *Der Energieausweis. Gut informiert – besser modernisiert*. Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9489-2_1
- Deutscher Alpenverein. (2021, Oktober). *Nachnutzung der ehemaligen Bundesgeschäftsstelle des Deutschen Alpenverein e.V. in der Von-Kahr-Str. 2-4 in 80997 München. Ausschreibung für Planungsleistungen*.
- DIN V, 18599-10 (September 2018). *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 14040 (Ferburar 2021). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN, 1990 (Oktober 2021). *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN, 15804 (März 2022). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DGNB GmbH (Hrsg.). (2021). *Kriterienkatalog Gebäude Sanierung - Version 2021. ENV1.1 Ökobilanz des Gebäudes*. Verfügbar unter: <https://www.dgnb-system.de/de/gebaeude/sanierung/kriterien/index.php>
- Dorsch, L., Kaiser, C., Niklasch, W., Schöpgens, H. & Spitzendorfer, J. (2017). *Marktübersicht. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen* (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Hrsg.).
- Ecoinvent (Hrsg.). (o. J.). *ecoQuery - Dataset Details (UPR). gypsum fibreboard production, RoW*. Verfügbar unter: <https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/6b5f6e68-c3da-43c4-a1ba-6eb26e7ac19f/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce>
- Ecoinvent (Hrsg.). (2022). *System Models*. Verfügbar unter: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>
- Filleti, R. A., Silva, D. A., Silva, E. J. & Ometto, A. R. (2014). Dynamic System for Life Cycle Inventory and Impact Assessment of Manufacturing Processes. *Procedia CIRP*, 15, 531–536. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.024>
- Gebäudeforum Klimaneutral (Hrsg.). (2022, März). *Graue Energie und Emissionen*. Verfügbar unter: <https://www.gebaeudeforum.de/wissen/ressourcen-und-emissionen/graue-energie-und-emissionen/>
- Gerhardt, N., Sandau, F., Becker, S., Scholz, A., Schmidt, D. & Schumacher, P. (2017, Februar). *Waermewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der - mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor* (Agora Energiewende, Hrsg.). Berlin.

- Google.. *Von-Kahr-Straße 2, 80997 München*. Verfügbar unter: <https://www.google.com/maps/place/Von-Kahr-Stra%C3%9Fe+2,+80997+M%C3%BCnchen/@48.1795264,11.4865663,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x479e779f576819d3:0xb9cda7d132412f98!8m2!3d48.1795264!4d11.4865663!16s%2Fg%2F11c2blmbyg>
- Hart Keramik AG (Hrsg.). (2018, Dezember). *Lemix Lehmplatte Bauphysik*. Verfügbar unter: <https://lemix.eu/produkt/Bauphysik>
- Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. & Seggewies, J.-K. (2018). *Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource* (Edition Detail, Erste Auflage). München: Detail Business Information GmbH. Verfügbar unter: <http://shop.detail.de/de/atlas-recycling.html>
- Khouli, S., John, V. & Zeumer, M. (2014). *Nachhaltig konstruieren. Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl: Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren* (Edition Detail green books). Freiburg: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.
- Kiesel, F. (2022, Dezember). *Die Energieversorgung 2022. Jahresbericht* (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Hrsg.). Berlin.
- Knauf Gesellschaft m. b. H. (Hrsg.). (2021, August). *Wohnungstrennwände. Sicher das richtige System*. Verfügbar unter: www.knauf.at
- Krinitzki, C., Kaczorowski, M. & Hartz, C. (2023, März). *Zu konstruktionsbedingten Treibhausgasemissionen (GWP) in der Tragwerksplanung am Beispiel ausgewählter Decken- und Wandkonstruktionen im Hochbau* (Technische Universität Dortmund, Hrsg.). Dortmund.
- Masson-Delmotte, V., Pirani, A., Chen, Y., Matthews, J. B. R., Yelekçi, O., Lonnoy, E. et al. (2021). *Climate Change 2021. The Physical Science Basis* (International panel on climate change (IPCC), Hrsg.).
- Münnich, P., Metz, J., Hauser, P., Kohn, A. & Mühlpointner, T. (2022, September). *Power-2-Heat. Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie* (Agora Industrie, Hrsg.). Berlin.
- Negishi, K., Tiruta-Barna, L., Schiopu, N., Lebert, A. & Chevalier, J. (2018). An operational methodology for applying dynamic Life Cycle Assessment to buildings. *Building and Environment*, 144, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.005>
- Neroth, G. & Vollenschaar, D. (Hrsg.). (2011). *Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz* (Praxis, 27., vollständig überarbeitete Auflage). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Nissler, D. (2022, Juli). *Sofortprogramm gemäß § 8 Abs. 1 KSG für den Sektor Gebäude* (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Hrsg.). Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/220713-bmwk-bmwsb-sofortprogramm.html>

- Passivhaus Institut (Hrsg.). (2015). *Qualitätsanforderungen an Passivhäuser*. Verfügbar unter: https://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm
- Passivhaus Institut (Hrsg.). (2023a). *Komponentendatenbank. Eingangstüren*. Verfügbar unter: <https://database.passivehouse.com/de/components/list/door>
- Passivhaus Institut (Hrsg.). (2023b). *Komponentendatenbank. Fenster*. Verfügbar unter: <https://database.passivehouse.com/de/components/list/window>
- Population Division (Hrsg.). (2022a). *Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2100 (in Milliarden)*.
- Population Division (Hrsg.). (2022b). *Weltbevölkerung von 1950 bis 2023 (in Milliarden)*. Verfügbar unter: <https://de-statista-com.eaccess.tum.edu/statistik/daten/studie/1716/umfrage/entwicklung-der-weltbevoelkerung/?locale=de>
- Potrč Obrecht, T., Jordan, S., Legat, A. & Passer, A. (2021). The role of electricity mix and production efficiency improvements on greenhouse gas (GHG) emissions of building components and future refurbishment measures. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(5), 839–851. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01920-2>
- Ramon, D. & Allacker, K. (2021). Integrating long term temporal changes in the Belgian electricity mix in environmental attributional life cycle assessment of buildings. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126624>
- Resch, E., Andresen, I., Cherubini, F. & Brattebø, H. (2021). Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings - Timing, uncertainty, and emission sources. *Building and Environment*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107399>
- Röck, M., Allacker, K., Auinger, M., Balouktsi, M., Birgisdottir, H., Fields, M. et al. (2022). Towards indicative baseline and decarbonization pathways for embodied life cycle GHG emissions of buildings across Europe. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012055>
- Roux, C., Schalbart, P. & Peuportier, B. (2016). Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house. *Journal of Cleaner Production*, 113, 532–540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.052>
- Schneider-Marin, P., Dotzler, C., Röger, C., Lang, W., Glöggler, J., Meier, K. et al. (2018, November). *Design2Eco: Schlussbericht. Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden – Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen*.
- Schneider-Marin, P., Harter, H. & Vollmer, M. (WECOBIS, Hrsg.). (2021). *Zwischen den Zeilen von Ökobilanzen*. Verfügbar unter: <https://www.wecobis.de/en/service/sonderthemen-info/gesamttext-oekobilanz-zwischen-den-zeilen-info/gesamttext-zwischen-den-zeilen-von-oekobilanzen-info.html>

- Schubert, S., Bartke, S., Becken, K., Breitmeier, M., Brozowski, F., DeTroy, S. et al. (2023, Februar). *Umwelt und Klima schützen – Wohnraum schaffen – Lebensqualität verbessern. Empfehlungen von UBA und KNBau für einen nachhaltigen Wohnungs- und Städtebau* (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Position). Dessau-Roßlau.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2022, Dezember). *15. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Annahmen und Ergebnisse*. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/begleitheft.html#631544>
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2023, Januar). *Bevölkerung im Jahr 2022 auf 84,3 Millionen gewachsen*. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/01/PD23_026_124.html
- Su, S., Li, X. & Zhu, Y. (2019). Dynamic assessment elements and their prospective solutions in dynamic life cycle assessment of buildings. *Building and Environment*, *158*, 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.008>
- Su, S., Li, X., Zhu, Y. & Lin, B. (2017). Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Energy and Buildings*, *149*, 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.042>
- Su, S., Zhang, H., Zuo, J., Li, X. & Yuan, J. (2021). Assessment models and dynamic variables for dynamic life cycle assessment of buildings: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, *28*(21), 26199–26214. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13614-1>
- Tagesschau.de (Hrsg.). (2023, März). *Die Beschlüsse des Koalitionsausschusses im Überblick*. Verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/inland/beschluesse-koalitionsausschuss-103.html>
- Thamling, N. & Rau, D. (2022). *Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz* (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Hrsg.).
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2022, März). *Entwicklung der spezifischen Emissionen des deutschen Strommix 1990-2020 und erste Schätzungen 2021 im Vergleich zu Emissionen der Stromerzeugung*. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2023, März). *UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9 Prozent. Mehr Kohle und Kraftstoff verbraucht – mehr Erneuerbare und insgesamt reduzierter Energieverbrauch dämpfen Effekte*. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um>
- Verband Fenster + Fassade & Bundesverband Fachglas e.V. (Hrsg.). (2014, März). *Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern*. Frankfurt am Main.
- Zelger, T., Figl, H., Scharnhorst, A., Lipp, B. & Waltjen, T. (2017). *Passivhaus-Bauteilkatalog: Sanierung. Ökologisch bewertete Konstruktionen*. Basel: Birkhäuser.

Zwiener, G. & Figl, H. (2018). *Ökologisches Baustoff-Lexikon. Bauprodukte, Chemikalien, Schadstoffe, Ökologie, Innenraum* (4. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin: VDE Verlag GmbH.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Auszug aus Ecoinvent-Datensatz zur Herstellung von 1 kg Gipsfaserplatte (ecoinvent, o. J.).....	18
Abb. 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise in der DLCA.....	18
Abb. 3: Luftaufnahme der Liegenschaft (Google).....	28
Abb. 4: Grundriss Erdgeschoss	29
Abb. 5: Grundriss 1. Obergeschoss	29
Abb. 6: Grundriss 2. Obergeschoss	30
Abb. 7: Schnitt A-A	30
Abb. 8: Betrachtete Lebenswegphasen (Schneider-Marin, Harter & Vollmer, 2021).....	35
Abb. 9: Verteilung der Gebäudehüllflächen.....	37
Abb. 10: Aufstellung der Energiebedarfe in der Variante <i>Klimaneutralität im Betrieb</i>	40
Abb. 11: Abgeschätzter Bauteilaufbau der Bestandsaußenwand.....	44
Abb. 12: Bauteilaufbau der Außenwand (KNB-Variante).....	45
Abb. 13: Bauteilaufbau der Außenwand (KFK-Variante)	46
Abb. 14: Abgeschätzter Bauteilaufbau der tragenden Bestandsinnenwand	47
Abb. 15: Bauteilaufbau der tragenden Innenwand (KNB-Variante)	47
Abb. 16: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand (KNB-Variante)	48
Abb. 17: Bauteilaufbau der nichttragenden Innenwand (KNB-Variante)	48
Abb. 18: Bauteilaufbau der tragenden Innenwand (KFK-Variante).....	49
Abb. 19: Bauteilaufbau der Wohnungstrennwand (KFK-Variante).....	49
Abb. 20: Bauteilaufbau der nichttragenden Innenwand (KFK-Variante)	50
Abb. 21: Abgeschätzter Bauteilaufbau der Bestandskellerdecke	50
Abb. 22: Bauteilaufbau der Kellerdecke im Wohnbereich (KNB-Variante).....	51
Abb. 23: Bauteilaufbau der Kellerdecke im Wohnbereich (KFK-Variante)	52
Abb. 24: Abgeschätzter Bauteilaufbau der Bestandsgeschossdecke.....	53
Abb. 25: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Wohnbereich (KNB-Variante)	53
Abb. 26: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Wohnbereich (KFK-Variante)	54
Abb. 27: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Verkehrsbereich (KNB-Variante)	54
Abb. 28: Bauteilaufbau der Geschossdecke im Verkehrsbereich (KFK-Variante).....	55
Abb. 29: Bauteilaufbau der Dachterrasse (KNB-Variante).....	56
Abb. 30: Bauteilaufbau der Dachterrasse (KFK-Variante).....	57
Abb. 31: Bauteilaufbau des Satteldachs (KNB-Variante).....	58
Abb. 32: Bauteilaufbau des Satteldachs (KFK-Variante).....	59
Abb. 33: Flächenverteilung nach Kostengruppen.....	60
Abb. 34: Massenverteilung nach Kostengruppen.....	60
Abb. 35: Volumenverteilung nach Baustoffen	61
Abb. 36: GWP nach Kostengruppen (SLCA ohne B6)	62
Abb. 37: GWP je m ² Bauteilfläche (SLCA)	63
Abb. 38: GWP nach Baustoffen (SLCA).....	63
Abb. 39: Treibhausgasemissionen über den Lebensweg (SLCA)	65

Abb. 40: GWP nach Bauteilschicht in der KNB-Variante und Verbesserungspotenziale (SLCA mit Verrechnung von Modul D).....	66
Abb. 41: Entwicklung und Prognose der Emissionen durch die Produktion von Strom und Wärme	71
Abb. 42: Durchschnittlicher Einfluss von Strom und Wärme in den Lebenswegphasen	71
Abb. 43: Vergleich des spezifischen GWPs von SLCA und DLCA in der KNB- Variante	72
Abb. 44: GWP je m ² Bauteilfläche (beide Varianten, SLCA und DLCA)	73
Abb. 45: Vergleich des spezifischen GWPs von SLCA und DLCA in der KFK- Variante.....	74
Abb. 46: Sensitivität der DLCA auf hinterlegte Szenarien der Strom- und Wärmeversorgung	75
Abb. A 1: GWP pro m ² Gipsfaserplatte für verschiedene Herstellungsjahre	100
Abb. A 2: GWP-Verteilung innerhalb der Kostengruppe 400 (SLCA).....	129
Abb. A 3: GWP-Anteile nach Lebenszyklusphasen in der KNB-Variante (SLCA)	129
Abb. A 4: GWP-Anteile nach Lebenszyklusphasen in der KFK-Variante (SLCA).....	129
Abb. A 5: GWP je m ² Bauteilfläche (SLCA)	130
Abb. A 6: GWP nach Kostengruppen (DLCA)	131
Abb. A 7: GWP nach Baustoffen (DLCA)	131
Abb. A 8: Methodik Vergleich zur Implementierung der DLCA	135
Abb. A 9: Schematische Darstellung der verschiedenen Prozessebenen bei der Herstellung von Dreifachverglasung	136
Abb. A 10: Globale CO ₂ -Restbudgets ab 2020 für verschiedene Klimaschutzziele und Eintrittswahrscheinlichkeiten (Masson- Delmotte et al., 2021, S. 29)	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Bauteilflächen (auf ganze Zahlen gerundet) von Innen- und Außenbauteilen	38
Tab. 2: Grundflächen (gerundet auf ganze Zahlen).....	39
Tab. 3: U-Wert Anforderungen an die Bauteile	42
Tab. 4: Paris-kompatible Emissionsgrenzwerte [kg CO ₂ -Äqv/m ² a] für die Wohnnutzung im DAV-Gebäude	80
Tab. A 1: Dekarbonisierungspfad für Strom und Wärme	99
Tab. A 2: Gebäudehüllflächen und Volumina (gerundet auf ganze Zahlen).....	101
Tab. A 3: Angesetzte Baustoffe in der Variante <i>Klimaneutralität im Betrieb</i>	112
Tab. A 4: Angesetzte Baustoffe in der Variante <i>Klimafreundliche Konstruktion</i>	119
Tab. A 5: Angesetzte TGA in beiden Varianten.....	123
Tab. A 6: Baustoffeigenschaften für die Sensitivitätsanalyse	135
Tab. A 7: CO ₂ -Restbudgets für Deutschland ab 2023 in Gt CO ₂ -Äqv.	137

Anhang 1: Rechenbeispiel zur Implementierung der dynamischen Energieversorgung

Als beispielhafte Rechnung zur Implementierung der dynamischen Faktoren wird die Herstellung von 1 m² Gipsfaserplatte ausgewählt, da hier der Einfluss von Strom und Wärme jeweils deutlich erkennbar ist. Nach dem Datensatz aus der Ökobaudat mit dem Referenzjahr 2018 werden durch die Herstellung von 1 m² Gipsfaserplatte 3,19 kg CO₂-Äqv. ausgestoßen. Davon fallen laut Ecoinvent 22,4 % auf die Versorgung mit Strom und 44,0 % auf die Versorgung mit Wärme an. (vgl. Datensatz in Anhang 8) Der dynamische Berechnungsansatz wird hier einmal für das Erstellungsjahr 2023 durchgeführt, in dem der Herstellungsprozess im Vergleich zum Jahr 2018 weniger CO₂-intensiv ist. Die Emissionsfaktoren des Strommixes bzw. die prozentuale Entwicklung der Emissionen durch Wärmeproduktion sind durch das Szenario des nationalen Dekarbonisierungspfad vorgegeben. (Vgl. Tab. A 1) Zur Veranschaulichung wird zusätzlich die Herstellung im Jahr 2045 abgebildet. Ab diesem Zeitpunkt werden Strom und Wärme bereits klimaneutral erzeugt, sodass hierdurch keine Emissionen mehr anfallen. Die Berechnung funktioniert analog. Die angegebenen Werte sind gerundet dargestellt.

Tab. A 1: Dekarbonisierungspfad für Strom und Wärme

Jahr	Emissionsfaktor Strom [kg CO ₂ /kWh]	Prozentualer Restwert der Emissionen durch Wärme zum Bezugsjahr 1990
2018	0,473 kg CO ₂ /kWh	68 %
2023	0,392 kg CO ₂ /kWh	57 %
2045	0,000 kg CO ₂ /kWh	0 %

Berechnung Strom

Schritt 1: Berechnung des Strombedarfs in kWh für die Herstellung von 1 m² Gipsfaserplatte

$$\frac{\text{Stromanteil am GWP} * \text{Gesamt-GWP}}{\text{Emissionsfaktor des Strommixes im Referenzjahr}} = \text{Strombedarf}$$

$$\frac{22,4 \% * 3,19 \text{ kg CO}_2}{0,473 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}} = 1,51 \text{ kWh}$$

Schritt 2: Hinterlegung des Strommixes zum Herstellungsjahr 2023 und Berechnung der durch den Strom entstehenden Treibhausgasemissionen

$$\text{Strombedarf} * \text{Emissionsfaktor im Herstellungsjahr} = \text{stromgeneriertes GWP im Herstellungsjahr}$$

$$1,51 \text{ kWh} * 0,392 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} = 0,59 \text{ kg CO}_2$$

Berechnung Wärme

Schritt 1: Berechnung des auf Wärme anfallenden GWPs im Referenzjahr

$$\text{Wärmeanteil am GWP} * \text{Gesamt-GWP} = \text{wärmegeneriertes GWP im Referenzjahr}$$

$$44,0 \% * 3,19 \text{ kg CO}_2 = 1,40 \text{ kg CO}_2$$

Schritt 2: Definition der bisherigen Reduktionsanstrengungen zum Referenzjahr des Datensatzes 2018

$$\text{wärmegeneriertes GWP im Referenzjahr} \triangleq \text{im Referenzjahr erreichtes THG-Reduktionsziel}$$

$$1,40 \text{ kg CO}_2 \triangleq 68 \% \text{ der CO}_2\text{-Emissionen in 1990}$$

Schritt 3: Rückrechnung der wärmegenerierten Emissionen im Jahr 1990

$$\frac{\text{Wärmeanteil am GWP} * \text{Gesamt-GWP}}{\text{THG-Reduktionsziel im Referenzjahr}} = \text{wärmegeneriertes GWP in 1990}$$

$$\frac{44,0 \% * 3,19 \text{ kg CO}_2}{68 \%} = 2,07 \text{ kg CO}_2$$

Schritt 4: Berechnung der Emissionen durch Prozesswärme zum Herstellungsjahr 2023

$$\text{wärmegeneriertes GWP in 1990} * \text{THG-Reduktionsziel im Herstellungsjahr} = \text{wärmegeneriertes GWP im Herstellungsjahr}$$

$$2,07 \text{ kg CO}_2 * 57 \% = 1,17 \text{ kg CO}_2$$

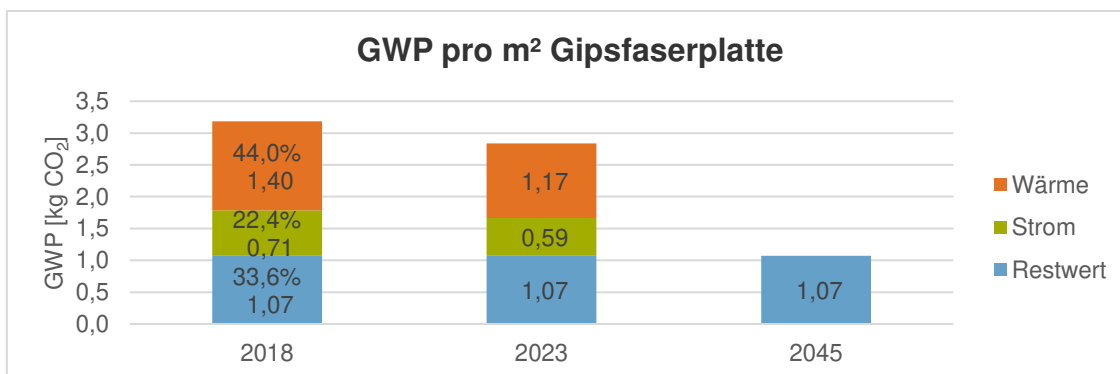


Abb. A 1: GWP pro m² Gipsfaserplatte für verschiedene Herstellungsjahre

Anhang 2: Zusatzinformationen zur Flächenberechnung

Tab. A 2: Gebäudehüllflächen und Volumina (gerundet auf ganze Zahlen)

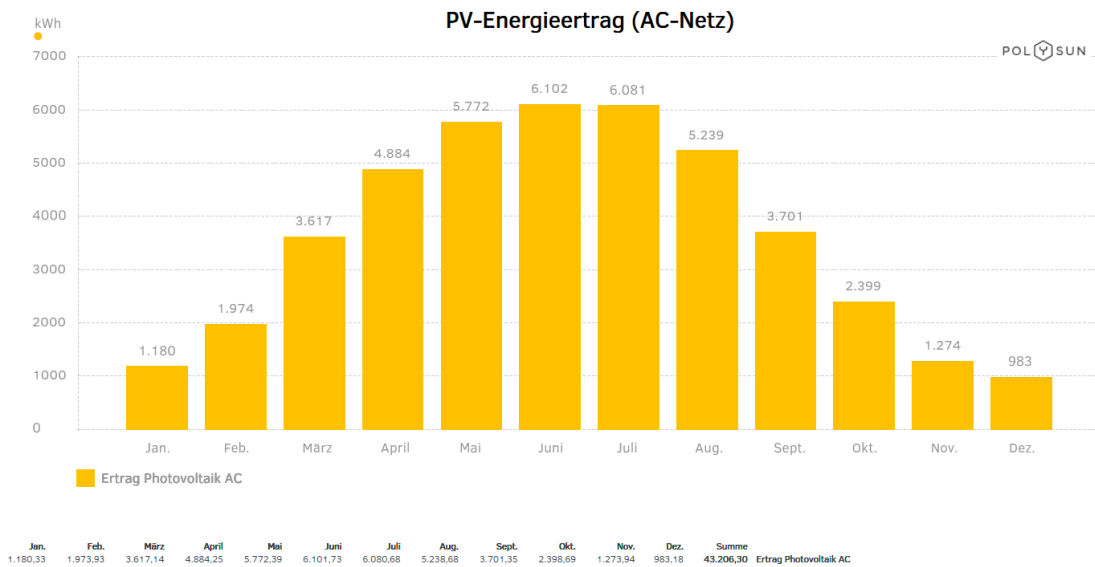
Bauteil	Ausrichtung bzw. Spezifizierung	Fläche in m ² / Volumen in m ³
Außenwand	Nord	148
	Ost	86
	Süd	131
	West	84
Fenster	Nord	55
	Ost	13
	Süd	89
	West	19
Außentür	Nord	18
	Ost	5
Dachterrasse	Horizontal	121
Satteldach	West (Neigung 22°)	53
	Ost (Neigung 20°)	43
	West (Neigung 15°)	56
	Ost (Neigung 20°)	44
	West (Neigung 22°)	41
	Ost (Neigung 27°)	43
	Gesamt	279
Kellerdecke	Horizontal (gg. unbeheizten Raum)	391
Volumen	Bruttovolumen	2919
	Nettovolumen	2218

Anhang 3: Solarertragsberechnung mit Polysun

Stammdaten	
Projektname	DAV Solarertragsberechnung
Kommentar	
Planungsverantwortung	
Software v.:	10.0.20.13455
Gebäude: Building (Anzahl der Module: 24)	
1_Westseite_Westausrichtung	
Anzahl der Module	24
Anlagenleistung	8,4 kWp
Ausrichtung [°]	248,8
Dachneigung [°]	21,95 °
Gebäude: Building (Anzahl der Module: 18)	
2_Westseite_Ostausrichtung	
Anzahl der Module	18
Anlagenleistung	6,3 kWp
Ausrichtung [°]	68,77
Dachneigung [°]	20,44 °
Gebäude: Building (Anzahl der Module: 30)	
3_Mitte_Westausrichtung	
Anzahl der Module	30
Anlagenleistung	10,5 kWp
Ausrichtung [°]	248,77
Dachneigung [°]	15,46 °
Gebäude: Building (Anzahl der Module: 24)	
4_Mitte_Ostausrichtung	
Anzahl der Module	24
Anlagenleistung	8,4 kWp
Ausrichtung [°]	68,77
Dachneigung [°]	19,57 °
Gebäude: Building (Anzahl der Module: 18)	
5_Ostseite_Westausrichtung	
Anzahl der Module	18
Anlagenleistung	6,3 kWp
Ausrichtung [°]	248,77
Dachneigung [°]	21,6 °
Gebäude: Building (Anzahl der Module: 18)	
6_Ostseite_Ostausrichtung	
Anzahl der Module	18
Anlagenleistung	6,3 kWp
Ausrichtung [°]	68,77
Dachneigung [°]	27,28 °
Anzahl der ModuleSumme	132
Anlagenleistung Summe	46,2 kWp
Ausgelegte Fläche	215,25 m ²

PV-Module [1_Westseite_Westausrichtung]

Hersteller:	Anonymous
Name	PV-Modul-350W
Breite [mm]:	1046
Höhe [mm]:	1559
Dicke [mm]:	46
Rahmung:	
Gewicht (kg)	19
Leistung [Watt]:	350
Zelltyp:	
Klemmsystem:	An der langen Seite
Rahmenfarbe	Aluminium
Temperaturkoeffizient [%/°C]:	-0,46
Wirkungsgrad STC:	0,225
Ausgangsstrom MPP - STC [A]:	6,107
Ausgangsspannung MPP - STC [V]:	57,3
Kurzschlussstrom [A]:	6,483
Leerlaufspannung (V):	68,2
Temperaturkoeffizient Strom [%/K]:	0,035
Temperaturkoeffizient Spannung [%/K]:	-0,3
Max. Systemspannung EU:	1000
Galvanische Trennung erforderlich:	Nein



Ertragswerte

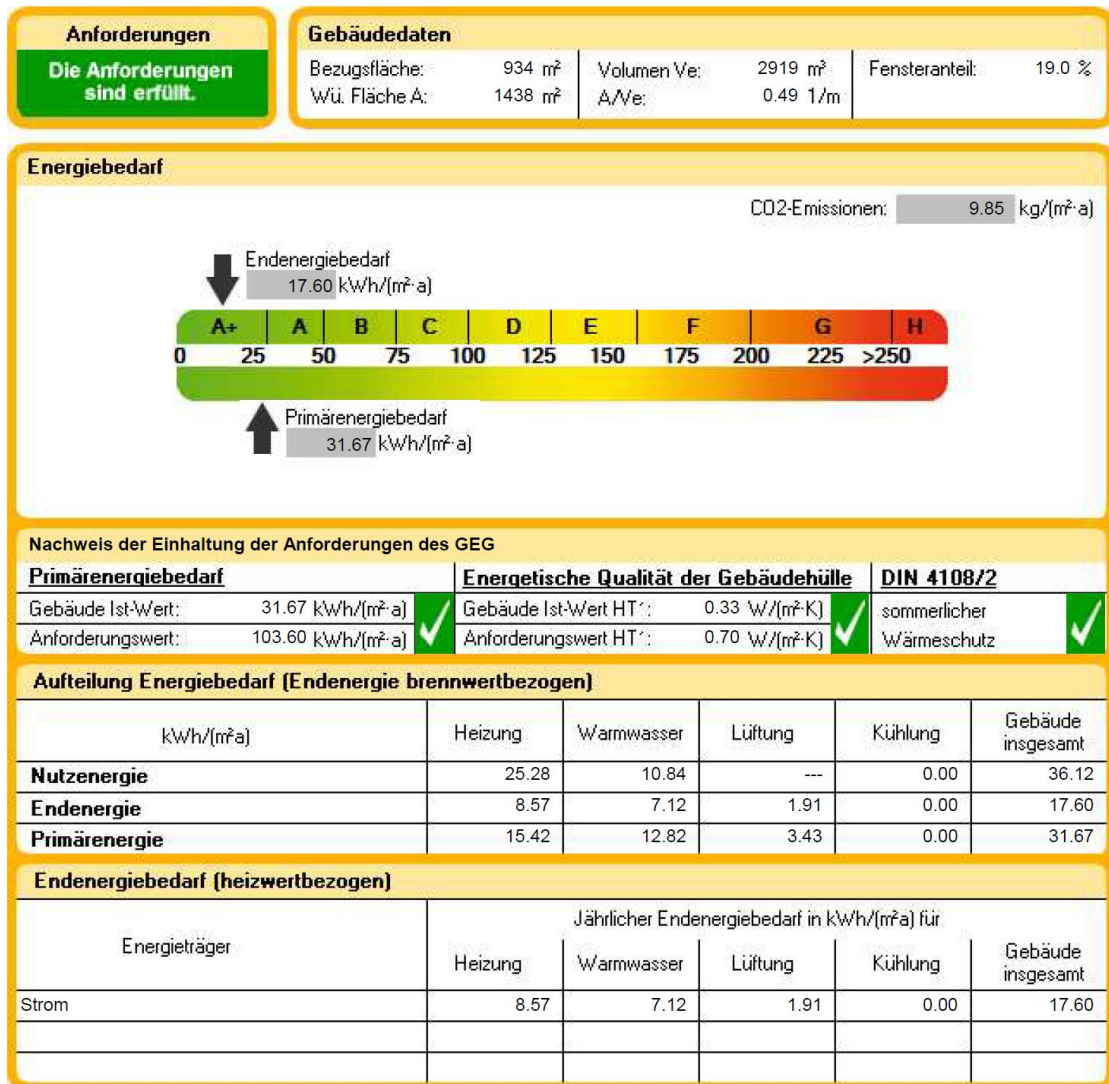
PV Planung # 1

Photovoltaik System	
PV-Generatorleistung <small> ⓘ Nominale Nennleistung aller Module nach STC (Standard Test Bedingungen)</small>	46,20 kW
Spitzenleistung des PV-Systems <small> ⓘ Maximalwert der Energieproduktion der Wechselrichter (AC) aus Wirkleistung</small>	37.438,43 W
Ertrag Photovoltaik DC <small> ⓘ Energieproduktion der Photovoltaik-Module (DC).</small>	45.385,96 kWh
Spezifischer Jahresertrag <small> ⓘ Energieproduktion der Wechselrichter pro kWp.</small>	935,20 kWh/kWp/a
Anlagennutzungsgrad (Performance Ratio) <small> ⓘ Verhältnis zwischen dem tatsächlichen und theoretische möglichen Energieertrag der Anlage</small>	81,02 %
PV-Energieertrag (AC-Netz) <small> ⓘ Energiemenge am Netzeinspeisepunkt im ersten Jahr</small>	43.206,30 kWh
PV-Generatorfläche <small> ⓘ gesamte Bruttofläche aller PV-Module</small>	215,25 m ²
Vermiedene CO²-Emissionen <small> ⓘ bezogen auf die CO² Emissionen die ohne PV Energieertrag üblicherweise durch Graustromproduktion emittiert würden</small>	25.923,78 kg
Energiefluss	
Netzeinspeisung <small> ⓘ PV-Energieertrag (AC Netz) abzüglich des Eigenverbrauchs</small>	43.206,30 kWh
Einstrahlungs-/Klimadaten	
Norm-Ausstemperatur <small> ⓘ Tiefstes Zweitagesmittel der Lufttemperatur, das 10 mal in 20 Jahren erreicht oder unterschritten wird.</small>	-15,00 °C
Globalstrahlung, Jahressumme <small> ⓘ Globale Einstrahlung auf die horizontale Ebene.</small>	1.183,67 kWh/m ²
Globale Strahlung - Interpolationsstationen <small> ⓘ Globale Strahlung - Interpolationsstationen</small>	Weissenburg, Weihenstephan, Ger, Hohenpeissenberg, Innsbruck Univ., Salzburg, SALZBURG/FREISAAL
Lufttemperatur - Interpolationsstationen <small> ⓘ Lufttemperatur - Interpolationsstationen</small>	Augsberg/Mulhausen, Nueburg / Donau (GAF), LECHFELD (GER-AFB), LANDSBERG (GER-AFB), Munich/Riem, Muenchen Airp.
Meteonorm Version <small> ⓘ Meteonorm Version</small>	8.1.2.15989
Meteonorm Erstellungsdatum <small> ⓘ Das Datum, an welchem die Meteonorm API erstellt (kompiliert) wurde.</small>	2022-07-08
Meteonorm Jahr <small> ⓘ Zeigt ein Beispieljahr als Platzhalter. Das Jahr 2005 ist der Mittelwert der Periode 1996-2015, auf welcher die Daten beruhen.</small>	2005

Anhang 4: 18599-Berechnung in SolarComputer

U-Werte nach BEG EM

Bauteil	U-Wert W/(m²K)	Fläche m²	%	Transmission kWh	%
AW01 - AW_San_U=0,2_BEG-EM	0.200	449.24	31.23	9072.65	22.05
FB01 - KD_San_U=0,25_BEG-EM	0.250	390.69	27.16	8319.02	20.22
DA01 - Satteldach_San_U=0,14_BEG-EM	0.140	279.10	19.40	4166.17	10.12
AF01 - AF_San_U=0,95_BEG-EM	0.950	176.50	12.27	15187.94	36.91
DA02 - Dachterasse_San_U=0,14_BEG-EM	0.140	120.51	8.38	1798.87	4.37
AT01 - TA_San_U=1,3_BEG-EM	1.300	22.33	1.55	2607.77	6.34
Gesamt:		1438.37	100.00	41152.40	100.00



U-Werte der KNB-Variante

Bauteil	U-Wert W/(m²K)	Fläche		Transmission	
		m²	%	kWh	%
AW06 - AW_San_U=0,17	0.170	449.24	31.23	7900.80	22.19
FB06 - KD_San_U=0,22	0.220	390.69	27.16	7455.12	20.94
DA01 - Satteldach_San_U=0,14_BEG-EM	0.140	279.10	19.40	4172.26	11.72
AF04 - AF_San_Passivhaus_U=0,80	0.800	176.50	12.27	12882.06	36.18
DA02 - Dachterasse_San_U=0,14_BEG-EM	0.140	120.51	8.38	1801.50	5.06
AT06 - TA_San_PVC_U=0,68	0.680	22.33	1.55	1394.15	3.92
Gesamt:		1438.37	100.00	35605.90	100.00

Anforderungen
 Die Anforderungen sind erfüllt.

Gebäudedaten
 Bezugsfläche: 934 m² Volumen Ve: 2919 m³ Fensteranteil: 19.0 %
 Wü. Fläche A: 1438 m² A/Ve: 0.49 1/m

Energiebedarf

CO2-Emissionen: 8.81 kg/(m²·a)

Endenergiebedarf: 15.74 kWh/(m²·a)

Primärenergiebedarf: 28.32 kWh/(m²·a)

Nachweis der Einhaltung der Anforderungen des GEG

Primärenergiebedarf		Energetische Qualität der Gebäudehülle		DIN 4108/2	
Gebäude Ist-Wert:	28.32 kWh/(m²·a) ✓	Gebäude Ist-Wert HT':	0.28 W/(m²·K) ✓	sommerlicher	✓
Anforderungswert:	103.60 kWh/(m²·a) ✓	Anforderungswert HT':	0.70 W/(m²·K) ✓	Wärmeschutz	✓

Aufteilung Energiebedarf (Endenergie brennwertbezogen)

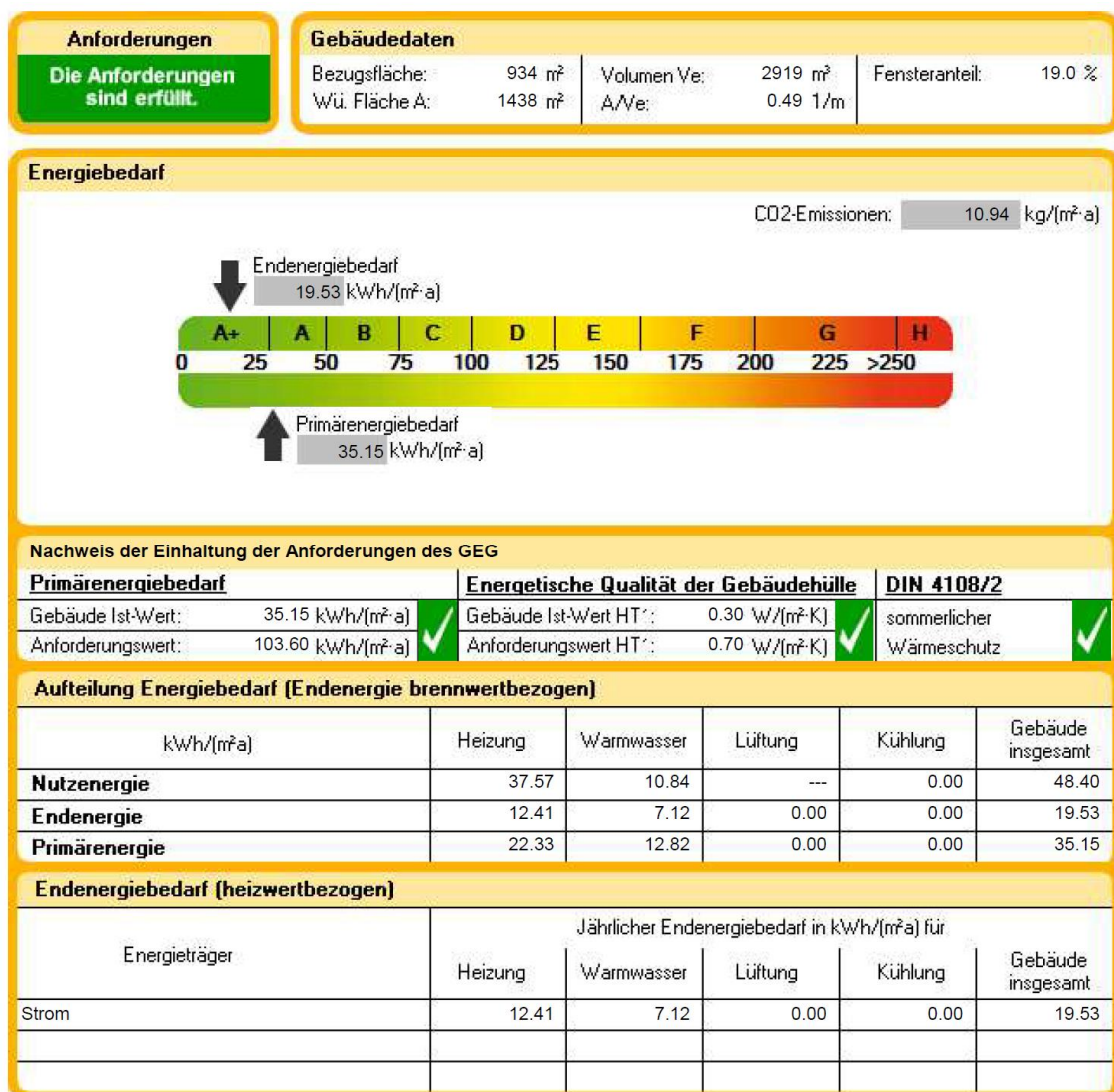
kWh/(m²·a)	Heizung	Warmwasser	Lüftung	Kühlung	Gebäude insgesamt
Nutzenergie	20.81	10.84	---	0.00	31.65
Endenergie	6.93	7.12	1.69	0.00	15.74
Primärenergie	12.47	12.81	3.04	0.00	28.32

Endenergiebedarf (heizwertbezogen)

Energieträger	Jährlicher Endenergiebedarf in kWh/(m²·a) für				
	Heizung	Warmwasser	Lüftung	Kühlung	Gebäude insgesamt
Strom	6.93	7.12	1.69	0.00	15.74

U-Werte der KFK-Variante

Bauteil	U-Wert W/(m²K)	Fläche		Transmission	
		m²	%	kWh	%
AW03 - AW_San_KF	0.210	449.24	31.23	9467.72	24.76
FB03 - KD_San_KF	0.230	390.69	27.16	7736.33	20.24
DA04 - Satteldach_San_KF	0.150	279.10	19.40	4411.52	11.54
AF04 - AF_San_Passivhaus_U=0,80	0.800	176.50	12.27	12864.08	33.65
DA06 - Dachterasse_San_KF	0.180	120.51	8.38	2222.28	5.81
AT07 - TA_San_Holz_U=0,75	0.750	22.33	1.55	1529.46	4.00
Gesamt:		1438.37	100.00	38231.40	100.00



Anhang 5: Verwendete Datensätze aus Ökobaudat und Ecoinvent

Der Anhang bildet eine Konkretisierung der verschiedenen Baustoffe mit Angabe der verwendeten Ökobaudat- und Ecoinvent-Datensätze. Zusätzlich sind Quellenangaben aufgeführt, welche bei der Entscheidungsfindung halfen. Generell werden in der Ecoinvent diejenigen Datensätze herausgesucht, die dem Produktsystem des verwendeten Ökobaudat-Datensatzes am nächsten kommen. In der Herstellungsphase von nachwachsenden Rohstoffen (A1 bis A3) kann wegen des negativen GWPs keine Berechnung stattfinden (vgl. 6.1.3). In der Ökobaudat sind außerdem für das EoL i. d. R. entweder Daten für die Lebenswegphasen C3 (Abfallbehandlung) oder C4 (Baustoffbeseitigung) vorhanden, selten aber für beide Phasen. Angelehnt an diese Information des komplementären Ökobaudat-Datensatzes wird der passende Datensatz aus der Ecoinvent gesucht. Datensätze zur Verbrennung von Baustoffen können prinzipiell in beide Lebenswegphasen eingeordnet werden (DIN EN 15804). Die Abkürzungen hinter den Ecoinvent-Datensätzen geben dabei die geografische Gültigkeit an.

- RER: Europe
- EwS: Europe without Switzerland
- RoW: Rest of World (meistens Abgrenzung zu Datensatz explizit für die Schweiz)
- GLO: Global

Tab. A 3: Angesetzte Baustoffe in der Variante *Klimaneutralität im Betrieb*

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kommentare
Wandbeschichtung innen/ Farbe	Dispersionsfarbe	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest (de) (generisch)	A: acrylic varnish production, with water, in 53% solution state (FER) C3: treatment of waste emulsion paint on wall, sorting plant (RoW) C4: treatment of waste emulsion paint, sanitary landfill (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl in Ökobaudat zwischen Kalk- und Dispersionsfarbe • Zwiener & Figl, 2018, S. 148
Wandbeschichtung innen/ Putz	Kalkputz	Kalk-Innenputz (de) (generisch)	A: cover plaster production, mineral (RoW) C3: treatment of waste mineral plaster, sorting plant (RoW) C4: treatment of waste mineral plaster, collection for final disposal (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • Hegger et al., 2005, S. 190 • BauNetz, o. J.b • Zwiener & Figl, 2018, S. 217, 321
Stahlbeton	Stahlbeton (2 M-% Armierungsanteil)	Transportbeton C20/25 (generisch) Bewehrungsstahl (generisch)	A: concrete production, 20MPa, with cement, Portland (RoW) C3: treatment of waste reinforced concrete, sorting plant (EwS)	
WDVS/ Dämmstoff	Mineralwolle WLG 040	Mineralwolle (Fassaden-Dämmung) (de) (generisch)	A: stone wool production, packed (RoW) C3: treatment of waste mineral wool, sorting plant (EwS) C4: treatment of waste mineral wool, inert material landfill (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> • Neroth & Vollenschaar, 2011, S. 1162–1163
WDVS/ Klebe- und Armiermörtel	Klebe- und Armiermörtel	Putzmörtel-Armierungsputz (de) (durchschnittlich – vom Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V.)	A: cover plaster production, mineral (RoW) C4: treatment of waste mineral plaster, collection for final disposal (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • Einzig verfügbarer Datensatz

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kommentare
WDVS/ Armierungsgitter	Armierungsgitter	Glasarmierungsgitter (de) (durchschnittlich – von VitruLAN Technical Textiles GmbH)	A & C3: kein passender Datensatz vorhanden	<ul style="list-style-type: none"> • Einzig verfügbarer Datensatz • Abmessungen des Gitters wurden aus dem EPD entnommen, um Prozentanteil der Armierungsschicht im Putz auszurechnen (VitruLAN Technical Textiles GmbH, 2022)
WDVS/ Oberputz	Kunstharzputz	Kunstharzputz (generisch)	A: cover plaster production, organic (RoW) C4: treatment of waste plastic plaster, sanitary landfill (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • BauNetz, o. J.t • Begrenze Auswahl in Ökobaudat
WDVS/ Außenanstrich	Dispersionsfarbe	Fassadenfarbe Dispersionsfarbe (de) (generisch)	A: acrylic varnish production, with water, in 53% solution state (REF) C4: treatment of waste emulsion paint, sanitary landfill (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> • Zwiener & Figl, 2018, S. 172
Trockenbau/ Unterkonstruktion	Metallprofil	Stahlprofil (de) (generisch)	A: kein passender Datensatz vorhanden (nur einzelne Prozessschritte) C4: treatment of waste reinforcement steel, recycling (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • Hegger et al., 2005, S. 160 • Prozentualer Anteil der Metallstädekonstruktion an der Dämmschicht wurde anhand klassischer Abmessungen der CW-Profile (Nennstärke 0,6 mm) (Knauf Gesellschaft m. b. H., 2022) berechnet • Hillebrandt et al., 2018, S. 68
Trockenbau/ Dämmung	Mineralwolle WLG 040	Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) (de) (generisch)	A: stone wool production, packed (RoW) C3: treatment of waste mineral wool, sorting plant (EwS) C4: treatment of waste mineral wool, inert material landfill (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> • Hegger et al., 2005, S. 136

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kommentare
Trockenbau/ Beplankung	Gipsfaserplatte	Gipsfaserplatte (Dicke 0,01 m) (de) (generisch)	A: gypsum fibreboard production (RoW) C4: treatment of waste gypsum, sanitary landfill (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> Hegger et al., 2005, S. 160 BauNetz, o. J.j Hillebrandt et al., 2018, S. 81–83
Ausgleichsschüttung Bodenaufbau	Zementgebundene Schüttung aus EPS-Partikeln	Schüttung aus Polystyrolschaumstoff-Partikeln (zementgebunden) (de) (generisch)	A: lightweight concrete block production, polystyrene (RoW) C3 & C4: kein passender Datensatz vorhanden	<ul style="list-style-type: none"> Einzig verfügbarer Datensatz
Trittschalldämmung	Mineralwolle WLG 040	Mineralwolle (Boden-Dämmung) (de) (generisch)	A: stone wool production, packed (RoW) C3: treatment of waste mineral wool, sorting plant (EwS) C4: treatment of waste mineral wool, inert material landfill (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> Kampshoff, 2021, S. 47
Trennlage im Bodenaufbau	PE-Folie	Dampfbremse PE (Dicke 0,0002 m) (de) (generisch)	A: fleece production, polyethylene (RER) C3: treatment of waste sealing sheet, polyethylene, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> Kampshoff, 2021, S. 48–49
Estrich	Zementestrich	Zementestrich (de) (generisch)	A: cement cast plaster floor production (RoW) C3: treatment of waste cement in concrete and mortar, sorting plant (EwS) C4: treatment of waste cement in concrete and mortar, collection for final disposal (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> BauNetz, o. J.f

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendeter Datensatz Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kommentare
Bodenbelag Wohnbereich	PVC-Fußbodenbelag	PVC Fußbodenbelag (de) (generisch)	A: polyvinylchloride production, suspension polymerisation (RER) C3: treatment of waste polyvinylchloride, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • Statista, 2022b • BauNetz, o. J.a • Kunststoffe.de
Bodenbelag Verkehrsbereich und KG	Fliesen	Steinzeugfliesen glasiert (Dicke 0,01 m) (generisch)	A: ceramic tile production (RoW) C3: kein passender Datensatz vorhanden	
Fliesenkleber	Fliesenkleber	Fliesenkleber (generisch)	A: adhesive mortar production (RoW) C4: treatment of waste cement in concrete and mortar, collection for final disposal (EwS)	
Flachdachabdichtung/ Ausgleichsschicht	Dampfdruck-Ausgleichsschicht	Bitumenbahnen V 60 (Dicke 0,005 m) (generisch)	A: bitumen seal production, V60 (RER) C4: treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • Zwiener & Figl, 2018, S. 94, 135 • Tipp-zum-bau.de • Scholz et al., 2016, 10.57 • Hillebrandt et al., 2018, S. 93
Flachdachabdichtung/ Bitumenabdichtung	Bitumenabdichtung unterhalb der Dämmung	Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) (Dicke 0,004 m) (generisch)	A: bitumen seal production (RER) C4: treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • Zwiener & Figl, 2018, S. 479 • Beschieferung dient vor allem als Schutz gegen Schlagregen, mechanische Beschädigung und UV-Strahlung (Malyszczyk, 2021) • Hillebrandt et al., 2018, S. 93
Flachdachabdichtung/ Bitumenabdichtung	Bitumenabdichtung oberhalb der Dämmung	Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) (Dicke 0,004 m) (generisch)	A: bitumen seal production (RER) C4: treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> • Zwiener & Figl, 2018, S. 479 • Beschieferung dient vor allem als Schutz gegen Schlagregen, mechanische Beschädigung und UV-Strahlung (Malyszczyk, 2021) • Hillebrandt et al., 2018, S. 93

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kommentare
Flachdachabdichtung/ Vlies	Vlies	PE/PP Vlies (generisch)	A: fleece production, polyethylene (RER) C3: treatment of waste sealing sheet, polyethylene, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> Zelger et al., 2017, S. 163
Flachdachdämmung	XPS-Dämmung	XPS-Dämmstoff (generisch)	A: polystyrene production, extruded, CO2 blown (RER) C3: treatment of waste polystyrene, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> BauNetz, o. J.c
Flachdacheindeckung/ Bekiesung	Kies	Kies 2/32 (generisch)	A: gravel production, crushed C3: kein passender Datensatz vorhanden	<ul style="list-style-type: none"> Euroquarz GmbH, 2006
Flachdacheindeckung/ Terrassenbelag	Terrassenbelag	Massivholzparkett (Durchschnitt DE) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> BauNetz, o. J.k Statista, 2022
Tragkonstruktion Satteldach	Konstruktionsvollholz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> BauNetz, o. J.p
Zwischensparrendämmung	Mineralwolle WLG 040	Mineralwolle (Schrägdach-Dämmung) (de) (generisch)	A: stone wool production, packed (RoW) C3: treatment of waste mineral wool, sorting plant (EwS) C4: treatment of waste mineral wool, inert material landfill (EwS)	<ul style="list-style-type: none"> Grimm, 2017 Die Gefachabmessung bzw. der Pfettenabstand wurde durch Ubakus automatisch vorgegeben und daraus der Anteil der Dämmung an der gesamten Schicht berechnet.

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kommentare
Satteldach/ Trag- und Konterlattung, Querlattung	Holzlattung	Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> BauNetz, o. J.h BauNetz, o. J.I Der Abstand der Konterlattung ergibt sich aus dem Abstand der Pfetten, der Abstand der Traglattung wurde mit 320 mm aus eigener Verlegeanleitung für Dachziegel entnommen. (Braas GmbH, 2015).
Dampfbremse	PE-Folie	Dampfbremse PE (Dicke 0,0002 m) (de) (generisch)	A: fleece production, polyethylene (RER) C3: treatment of waste sealing sheet, polyethylene, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> BauNetz, o. J.g
Unterdeckplatte	Holzfasерplatte	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)	<ul style="list-style-type: none"> BauNetz, o. J.m
Dacheindeckung Satteldach	Dachziegel	Dachziegel (de) (generisch)	A: roof tile production (RER) C3: treatment of waste brick, sorting plant (EWS)	<ul style="list-style-type: none"> (BauNetz, o. J.c)

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kommentare
Fenster & Eingangstüren	PVC-Rahmenfenster / -türen	Blendrahmen PVC-U (de) Flügelrahmen PVC-U (de) Dreitachverglasung (Dicke: 0,036 m) (de) Elastomer Fugenbänder, Polyurethan (de) Fenster-Beschlag für Drehkippenfenster (Aluminium) (de) Fenstergriff (de) (alle generisch)	A Rahmen: window frame production, poly vinyl chloride, U=1.6 W/m ² K (RER) C4 Rahmen: treatment of used window frame, plastic, collection for final disposal (RoW) A Verglasung: glazing production, triple, U<0.5 W/m ² K (RER) C3 Verglasung: treatment of waste glass pane in burnable frame, sorting plant (RoW) C4 Verglasung: treatment of used triple glazing, U<0.5W/m ² K, collection for final disposal (RoW)	
Innentüre	Holz-Türe	Lacksysteme Holzfenster Decklack weiß (de) Lacksysteme Holzfenster Grundierung weiß (de) (beide generisch) Spanplatte, roh (Durchschnitt DE) (de) Röhrenspanplatte (Durchschnitt DE) (de) (beide repräsentativ)	A Türe: door production, inner, wood (RER) C3 Türe: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW) A Lack: acrylic varnish production, with water, in 53% solution state C3 Lack: kein passender Datensatz vorhanden	

Tab. A 4: Angesetzte Baustoffe in der Variante *Klimafreundliche Konstruktion*

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent
Wandbeschichtung innen/ Farbe	Kalkfarbe	Kalkfarbe (generisch)	A: acrylic varnish production, with water, in 53% solution state (RER) C4: treatment of waste paint, sanitary landfill (EwS)
Wandbeschichtung innen/ Putz	Lehmputz	Lehmputz (generisch)	A: clay plaster production (RoW) C3: kein passender Datensatz vorhanden
Stahlbeton	Stahlbeton (2 M-% Armierungsanateil)	Transportbeton C20/25 (generisch) Bewehrungsstahl (generisch)	A: concrete production, 20MPa, with cement, Portland (RoW) C3: treatment of waste reinforced concrete, sorting plant (EwS)
VHF/ Unterkonstruktion, Hinterlüftung	Holzkonstruktion	Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
VHF/ Dämmstoff, Unterdeckplatte	Holzfaserverplatte WLG 044	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
VHF/ Fassadenbekleidung	Holzverkleidung	3- und 5-Schicht Massivholzplatte (Durchschnitt DE) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Trockenbau/ Unterkonstruktion	Holzständer	Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Trockenbau/ Dämmung	Holzfaserdämmung WLG 044	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent
Trockenbau/ Beplankung	Lehmbauplatte	Lehmbauplatte (Dicke 0,02 m) (generisch)	A: clay plaster production (RoW) C3: kein passender Datensatz vorhanden
Ausgleichsschüttung Bodenaufbau	Zementgebundene Schüttung aus EPS-Partikeln	Schüttung aus Polystyrolschaumstoff-Partikeln (zementgebunden) (de) (generisch)	A: lightweight concrete block production, polystyrene (RoW) C3 & C4: kein passender Datensatz vorhanden
Trittschalldämmung	Holzfaserdämmung WLG 044	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Trennlage im Bodenaufbau	Kraftpapier	Kraftpapier (generisch)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Estrich	Calciumsulfatestrich	Calciumsulfatestrich (generisch)	A: anhydrite floor production (RoW) C: kein passender Datensatz vorhanden
Bodenbelag Wohnbereich	Massivholzparkett	Massivholzparkett (Durchschnitt DE) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Bodenbelag Verkehrsreich und KG	Fliesen	Steinzeugfliesen glasiert (Dicke 0,01 m) (generisch)	A: ceramic tile production (RoW) C3: kein passender Datensatz vorhanden
Fliesenkleber	Fliesenkleber	Fliesenkleber (generisch)	A: adhesive mortar production (RoW) C4: treatment of waste cement in concrete and mortar, collection for final disposal (EwS)
Flachdachabdichtung/ Ausgleichsschicht	Dampfdruck-Ausgleichsschicht	Bitumenbahnen V 60 (Dicke 0,005 m) (generisch)	A: bitumen seal production, V60 (RER) C4: treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration (RoW)

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent
Flachdachabdichtung/ Bitumenabdichtung	Bitumenabdichtung unterhalb der Dämmung	Bitumenbahnen PYE PV 200 S5 (ungeschiefert) (Dicke 0,004 m) (generisch)	A: bitumen seal production (RER) C4: treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration (RoW)
Flachdachabdichtung/ Bitumenabdichtung	Bitumenabdichtung oberhalb der Dämmung	Bitumenbahnen PYE-PV 200 S5 ns (geschiefert) (Dicke 0,004 m) (generisch)	A: bitumen seal production (RER) C4: treatment of waste bitumen sheet, municipal incineration (RoW)
Flachdachabdichtung/ Vlies	Vlies	PE/PP Vlies (generisch)	A: fleece production, polyethylene (RER) C3: treatment of waste sealing sheet, polyethylene, municipal incineration (RoW)
Flachdachdämmung	Holzfaserdämmung WLG 044	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Flachdacheindeckung/ Bekiesung	Kies	Kies 2/32 (generisch)	A: gravel production, crushed C3: kein passender Datensatz vorhanden
Flachdacheindeckung/ Terrassenbelag	Terrassenbelag	Massivholzparkett (Durchschnitt DE) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Tragkonstruktion Satteldach	Konstruktionsvollholz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Zwischensparrendämmung	Holzfaserdämmung WLG 044	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Satteldach/ Trag- und Konterlattung, Querlattung	Holzlattung	Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)

Anwendungsgebiet des Baustoffes	Baustoff	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent
Dampfbremse	Kraftpapier	Kraftpapier (generisch)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Unterdeckplatte	Holzfaserplatte WLG 044	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de) (repräsentativ)	A: Keine Berechnung möglich C3: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW)
Dacheindeckung Satteldach	Dachziegel	Dachziegel (de) (generisch)	A: roof tile production (RER) C3: treatment of waste brick, sorting plant (EwS)
Fenster & Eingangstüren	Holz-Rahmenfenster / -türen	Holz-Blendrahmen (de) Holz-Flügelrahmen (de) Dreifachverglasung (Dicke: 0,036 m) (de) Elastomer Fugenbänder, Polyurethan (de) Fenster-Beschlag für Drehkippenfenster (Aluminium) (de) Fenstergriff (de) (alle generisch)	A Rahmen: window frame production, wood, U=1.5 W/m2K (RER) C4 Rahmen: treatment of used window frame, wood, collection for final disposal (RoW) A Verglasung: glazing production, triple, U<0.5 W/m2K (RER) C3 Verglasung: treatment of waste glass pane in burnable frame, sorting plant (RoW) C4 Verglasung: treatment of used triple glazing, U<0.5W/m2K, collection for final disposal (RoW)
Innentüre	Holz-Türe	Lacksysteme Holzfenster Decklack weiß (de) Lacksysteme Holzfenster Grundierung weiß (de) (beide generisch) Spanplatte, roh (Durchschnitt DE) (de) Röhrenspanplatte (Durchschnitt DE) (de) (beide repräsentativ)	A Türe: door production, inner, wood (RER) C3 Türe: treatment of waste wood, untreated, municipal incineration (RoW) A Lack: acrylic varnish production, with water, in 53% solution state C3 Lack: kein passender Datensatz vorhanden

Tab. A 5: Angesetzte TGA in beiden Varianten

Kostengruppe	TGA-Komponente	Verwendeter Datensatz Ökobaudat	Verwendete Datensätze Ecoinvent	Quellenangaben für die Entscheidungsfindung und Kom- mentare
421 Wärmeerzeugungsanlage	Luft-Wasser-Wärmepumpe 24 kW (ca. 340 kg)	Strom Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10 kW (generisch) Heruntergerechnet auf kg	A: heat pump production, 30kW (RER) basierend auf heat pump production, brine-water, 10kW (RoW) C3 & C4: kein passender Datensatz vorhanden	<ul style="list-style-type: none"> • Dimplex Deutschland • Viessmann • Stiebel Eltron, S. 2
429 Wärmeversorgungsanlage	Pufferspeicher (59,5 kg)	Pufferspeicher (Stahl) (generisch)	A: hot water tank production, 600l (Row) C3: kein passender Datensatz vorhanden	<ul style="list-style-type: none"> • Hegger et al., 2005, S. 190 • BauNetz, o. J.a • Zwiener & Figl, 2018, S. 217, 321
431 Lüftungsanlagen	Zentrale Lüftungsanlage	Lüfter zentral mit WRG 10000 m³/h (generisch)	A: ventilation system production, central, 1 x 720 m³/h, steel ducts, with earth tube heat exchanger (Row) C3 & C4: kein passender Datensatz vorhanden	
442 Eigenstromversorgungsanlagen	PV-Anlage	Photovoltaiksystem 1200 kWh/m²a (ohne Stromgutschrift) (generisch)	A: photovoltaic panel production, single-Si wafer (RER) C4: kein passender Datensatz vorhanden	
460 Förderanlagen	Fahrstuhl	Fahrstuhl - Grundkomponenten (stockwerkunabhängig) Fahrstuhl - Komponenten (stockwerkabhängig) (beide generisch)	A: elevator production, hydraulic (GLO) C3 & C4: kein passender Datensatz vorhanden	

Anhang 6: U-Wert-Berechnungen in Ubakus

Gebäudehüllflächen in der KNB-Variante:

Außenwand

LCA_AW_San_KN, U=0,17 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	Dispersionsfarbe	0,20	0,600	0,003
2	Kalkputz	1,00	0,870	0,011
3	Beton armiert (1%)	30,00	2,300	0,130
4	Klebe- und Armiermörtel	0,50	0,540	0,009
5	Mineralwolle WLG 040	22,00	0,040	5,500
6	Klebe- und Armiermörtel	0,50	0,540	0,009
7	Kunstharzputz	1,00	0,700	0,014
8	Dispersionsfarbe	0,20	0,600	0,003
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040

Kellerdecke

LCA_KD_San_KN, U=0,22 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	PVC-weich als Belag	1,00	0,350	0,029
2	Zementestrich	5,00	1,400	0,036
3	Folie, PE	0,02	0,400	0,001
4	Trittschalldämmung MW 040	3,00	0,040	0,750
5	Polystyrolschaumstoff-Schüttung	5,00	0,050	1,000
6	Beton armiert (1%)	22,00	2,300	0,096
7	Klebe- und Armiermörtel	0,50	1,000	0,005
8	Mineralwolle WLG040	10,00	0,040	2,500
9	Klebe- und Armiermörtel	0,50	1,000	0,005
10	Kunstharzputz	1,00	0,700	0,014
11	Dispersionsfarbe	0,20	0,600	0,003
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,100

Dachterrasse

LCA_FD_San_KN, U=0,14 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	Dispersionsfarbe	0,20	0,600	0,003
2	Kalkputz	1,00	0,870	0,011
3	Beton armiert (1%)	22,00	2,300	0,096
4	Dampfdruckausgleichsschicht, Bitumen-Lochvlies	0,20	0,220	0,009
5	PYE-Bitumenschweißbahn	0,40	0,400	0,010
6	Hartschaum, XPS 035	22,00	0,035	6,286
7	Dampfdruckausgleichsschicht, Bitumen-Lochvlies	0,20	0,220	0,009
8	PYE-Bitumenschweißbahn	0,40	0,400	0,010
9	PYE-Bitumenschweißbahn	0,40	0,400	0,010
10	Kunststoffvlies	0,50	1,000	0,005
11	Kies	6,00	0,810	0,074
12	Holz-Terrassenbelag	4,00	0,130	0,308
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040

Satteldach

LCA_SDA_San_KN, U=0,14 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	Dispersionsfarbe	0,20	0,600	0,003
2	Gipsfaserplatte	1,00	0,350	0,029
3	Mineralwolle WLG 040	8,00	0,040	2,000
	Fichte (11%)	8,00	0,130	0,615
4	Folie, PE	0,02	0,400	0,001
5	Mineralwolle WLG 040	24,00	0,040	6,000
	Fichte (17%)	24,00	0,130	1,846
6	Unterdeckplatte Holzfaser	2,20	0,044	0,500
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,100

Gebäudehüllflächen in der KFK-Variante:

Außenwand

LCA_AW_San_KF, U=0,21 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	Kalkfarbe	0,20	0,600	0,003
2	Lehmputz	1,00	0,870	0,011
3	Beton armiert (1%)	30,00	2,300	0,130
4	Holzfaserdämmstoff (WF 044)	10,00	0,044	2,273
	Fichte (9,1%)	10,00	0,130	0,769
5	Holzfaserdämmstoff (WF 044)	10,00	0,044	2,273
	Fichte (9,1%)	10,00	0,130	0,769
6	Unterdeckplatte Holzfaser	2,00	0,049	0,408
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,130

Kellerdecke

LCA_KD_San_KF, U=0,23 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	Massivholzparkett	0,80	0,130	0,062
2	Calciumsulfat Heizestrich	5,00	1,600	0,031
3	Kraftpapier	0,02	0,170	0,001
4	Trittschalldämmung Holzfaserdämmstoff	3,00	0,044	0,682
5	Polystyrolschaumstoff-Schüttung	5,00	0,050	1,000
6	Beton armiert (1%)	22,00	2,300	0,096
7	Holzfaserdämmstoff (WF 044)	10,00	0,044	2,273
	Fichte (6,2%)	10,00	0,130	0,769
8	Lehmbauplatte	2,00	0,140	0,143
9	Kalkfarbe	0,20	0,600	0,003
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,100

Dachterrasse

LCA_FD_San_KF, U=0,18 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	Kalkfarbe	0,20	0,600	0,003
2	Lehmputz	1,00	0,870	0,011
3	Beton armiert (1%)	22,00	2,300	0,096
4	Dampfdruckausgleichsschicht, Bitumen-Lochvlies	0,20	0,220	0,009
5	PYE-Bitumenschweißbahn	0,40	0,400	0,010
6	Holzfaserdämmstoff (WF 044)	22,00	0,044	5,000
7	Dampfdruckausgleichsschicht, Bitumen-Lochvlies	0,20	0,220	0,009
8	PYE-Bitumenschweißbahn	0,40	0,400	0,010
9	PYE-Bitumenschweißbahn	0,40	0,400	0,010
10	Kunststoffvlies	0,50	1,000	0,005
11	Kies	6,00	0,810	0,074
12	Holz-Terrassenbelag	4,00	0,130	0,308
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040

Satteldach

LCA_SDA_San_KF, U=0,15 W/(m²K)

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m²K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	Kalkfarbe	0,20	0,600	0,003
2	Lehmbauplatte	2,00	0,140	0,143
3	Holzfaserdämmstoff (WF 044)	8,00	0,044	1,818
	Fichte (11%)	8,00	0,130	0,615
4	Kraftpapier	0,00	0,170	0,000
5	Holzfaserdämmstoff (WF 044)	24,00	0,044	5,455
	Fichte (17%)	24,00	0,130	1,846
6	Unterdeckplatte Holzfaser	2,20	0,044	0,500
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,100

Anhang 7: Zusätzliche Diagramme zu SLCA und DLCA

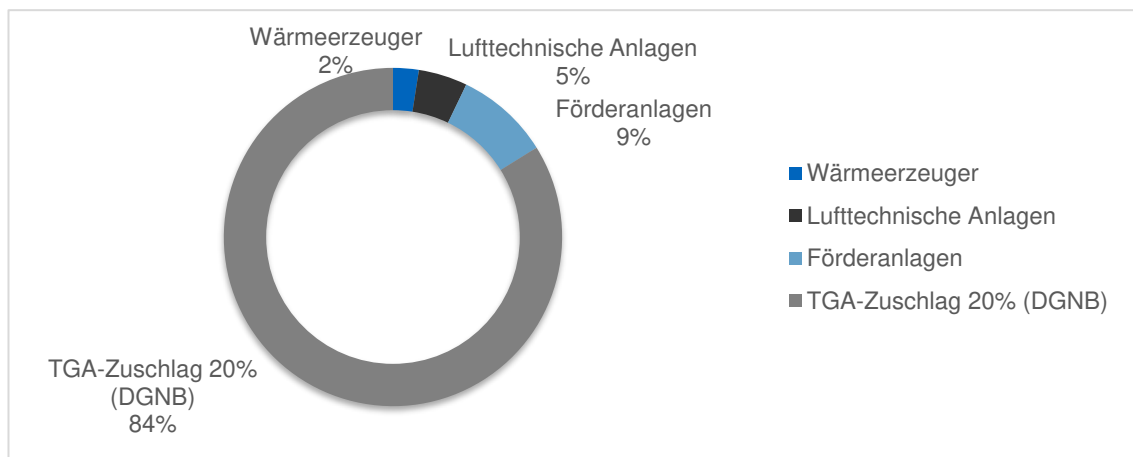


Abb. A 2: GWP-Verteilung innerhalb der Kostengruppe 400 (SLCA)

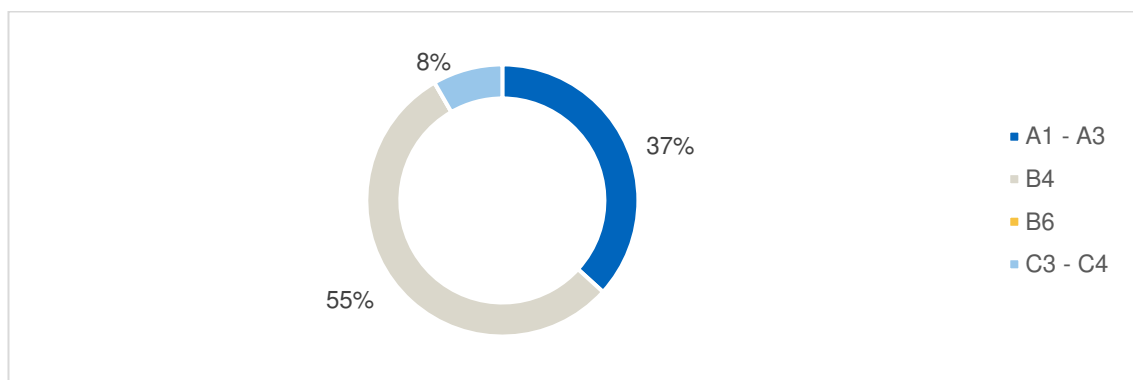


Abb. A 3: GWP-Anteile nach Lebenszyklusphasen in der KNB-Variante (SLCA)

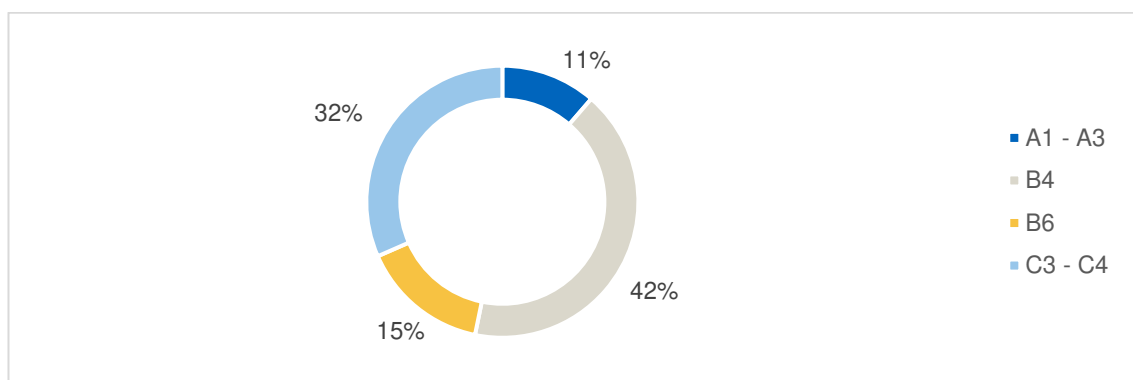


Abb. A 4: GWP-Anteile nach Lebenszyklusphasen in der KFK-Variante (SLCA)

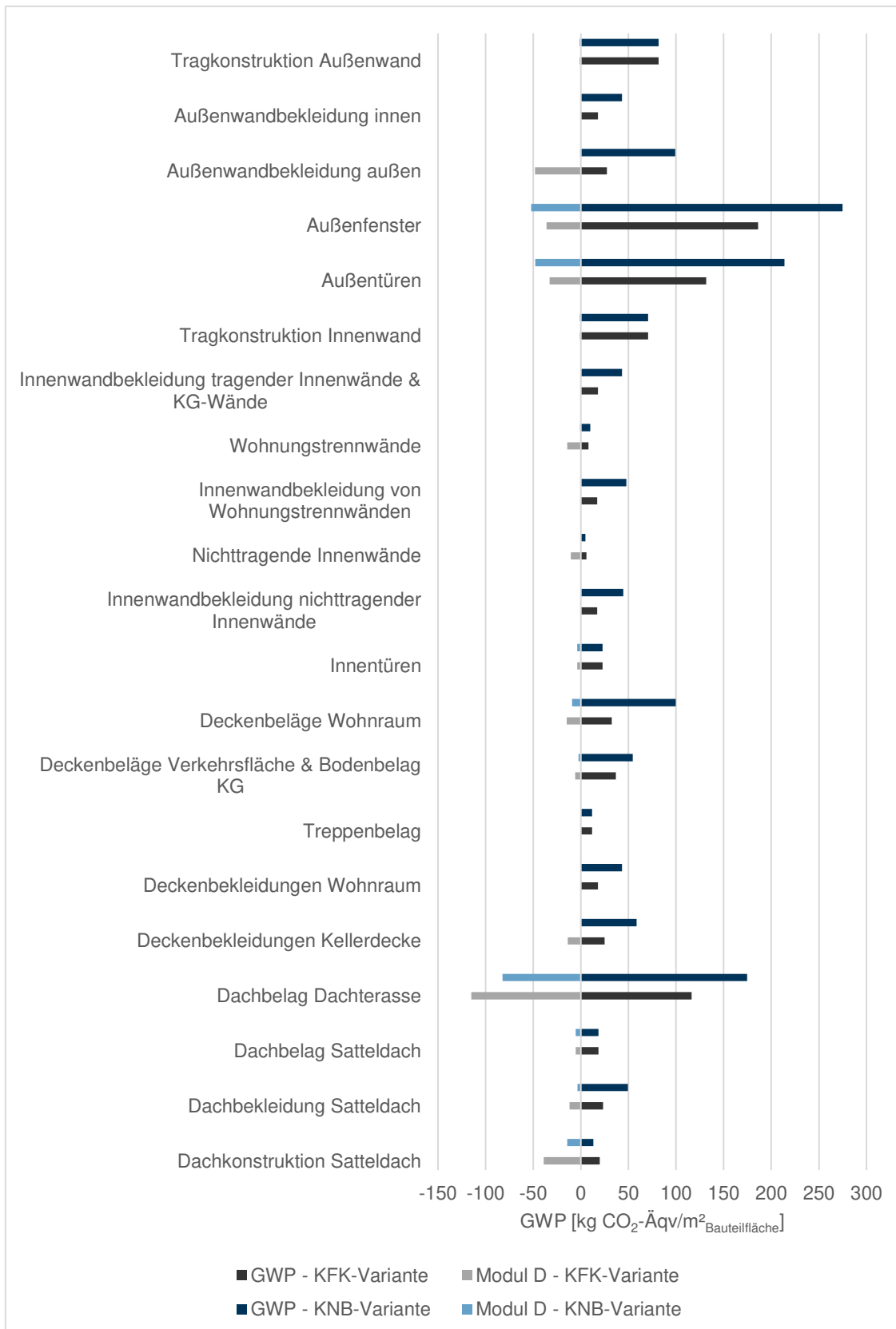


Abb. A 5: GWP je m² Bauteilfläche (SLCA)

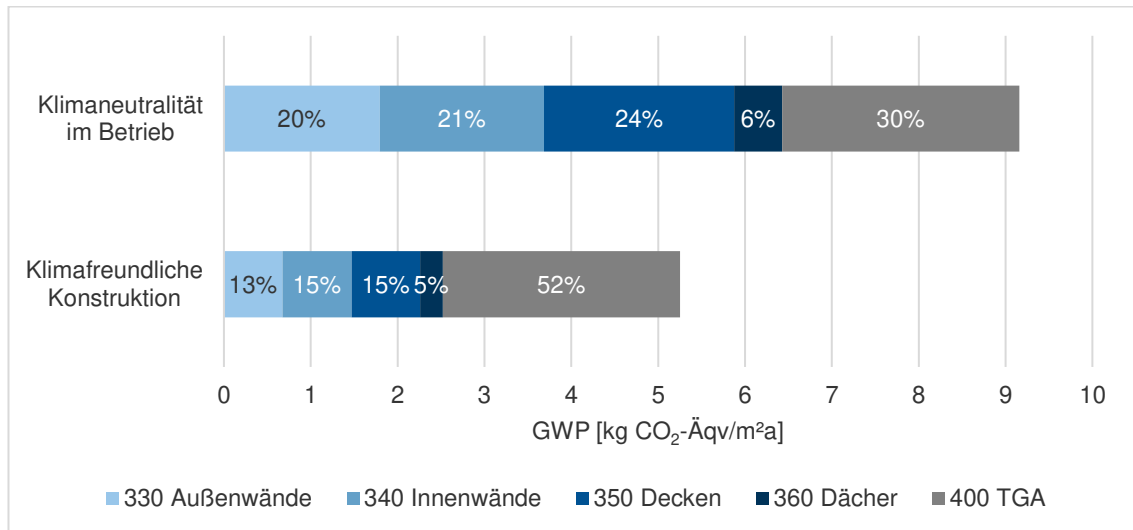


Abb. A 6: GWP nach Kostengruppen (DLCA)

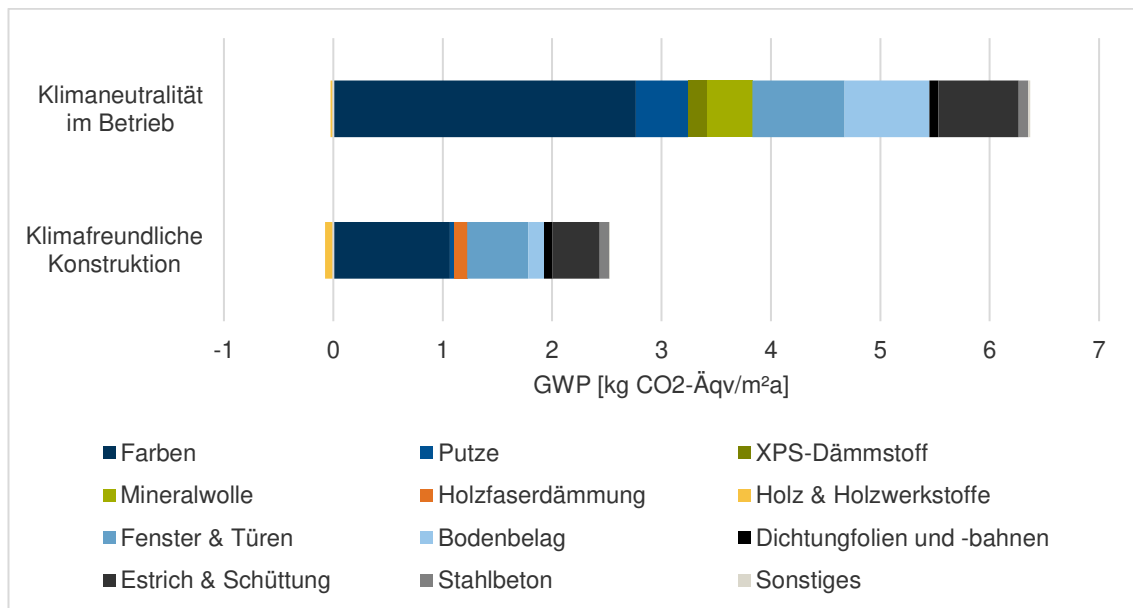


Abb. A 7: GWP nach Baustoffen (DLCA)

Anhang 8: Auszüge aus den referenzierten Ecoinvent-Datensätzen

Datensatz zur kontrollierten Verbrennung von Holz (in Arbeit für alle nachwachsenden Rohstoffe verwendet):

IPCC 2021, climate change, global warming potential (GWP100): **0.0152 kg CO2-Eq**

Exchange	Amount	Impact (kg CO2-Eq)	Impact %
municipal waste incineration facility market for municipal waste incineration facility - GLO	2.5e-10 unit	0.00419	27.59%
Dinitrogen monoxide air - urban air close to ground	1.47e-05 kg	0.00402	26.49%
heat, district or industrial, natural gas market for heat, district or industrial, natural gas - RoW	0.0628 MJ	0.00239	15.76%
heat, district or industrial, natural gas market for heat, district or industrial, natural gas - Europe without Switzerland	0.0232 MJ	0.00128	8.44%
ammonia, anhydrous, liquid market for ammonia, anhydrous, liquid - RoW	0.000281 kg	0.000903	5.95%
cement, unspecified market for cement, unspecified - RoW	0.000775 kg	0.000655	4.32%
ammonia, anhydrous, liquid market for ammonia, anhydrous, liquid - CN	9.75e-05 kg	0.000503	3.31%
quicklime, milled, packed market for quicklime, milled, packed - RoW	0.000182 kg	0.000227	1.49%
titanium dioxide market for titanium dioxide - RoW	2.91e-05 kg	0.000196	1.29%
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state - GLO	7.82e-05 kg	0.000101	0.67%
ammonia, anhydrous, liquid market for ammonia, anhydrous, liquid - SAS	2.53e-05 kg	8.14e-05	0.54%
heat, district or industrial, natural gas market for heat, district or industrial, natural gas - CA-QC	0.00103 MJ	7.32e-05	0.48%
ammonia, anhydrous, liquid market for ammonia, anhydrous, liquid - RNA	2.58e-05 kg	6.92e-05	0.46%
cement, unspecified market for cement, unspecified - IN	7.7e-05 kg	5.66e-05	0.37%
chemical, inorganic market for chemical, inorganic - GLO	2.88e-05 kg	5.33e-05	0.35%

39 minor direct contributors have been omitted for clarity

Datensatz zur unkontrollierten Verbrennung von Holz

IPCC 2021, climate change, global warming potential (GWP100): **0.191 kg CO2-Eq**

Exchange	Amount	Impact (kg CO2-Eq)	Impact %
Methane, non-fossil air - urban air close to ground	0.0059 kg	0.159	83.39%
Dinitrogen monoxide air - urban air close to ground	0.000116 kg	0.0317	16.61%

Datensatz zur Herstellung von 1 m² Gipsfaserplatte

IPCC 2021, climate change, global warming potential (GWP100): **0.274 kg CO2-Eq**

Exchange	Amount	Impact (kg CO2-Eq)	Impact %
heat, district or industrial, other than natural gas market for heat, district or industrial, other than natural gas - RoW	1.1 MJ	0.12	43.98%
stucco market for stucco - GLO	0.71 kg	0.0709	25.9%
electricity, medium voltage market group for electricity, medium voltage - RAS	0.0469 kWh	0.0433	15.8%
waste paper, sorted market for waste paper, sorted - GLO	0.15 kg	0.0122	4.45%
electricity, medium voltage market group for electricity, medium voltage - RNA	0.0164 kWh	0.00721	2.63%
potato starch market for potato starch - GLO	0.0029 kg	0.0048	1.75%
electricity, medium voltage market group for electricity, medium voltage - Europe without Switzerland	0.0112 kWh	0.00398	1.45%
electricity, medium voltage market for electricity, medium voltage - RU	0.00348 kWh	0.00248	0.9%
heat, district or industrial, other than natural gas market for heat, district or industrial, other than natural gas - Europe without Switzerland	0.028 MJ	0.00198	0.72%
electricity, medium voltage market group for electricity, medium voltage - RAF	0.00256 kWh	0.00191	0.7%
electricity, medium voltage market group for electricity, medium voltage - RLA	0.00511 kWh	0.00178	0.65%
wooden board factory, organic bonded boards market for wooden board factory, organic bonded boards - GLO	1.67e-11 unit	0.00137	0.5%
electricity, medium voltage market for electricity, medium voltage - AU	0.000776 kWh	0.000754	0.28%
silicone product market for silicone product - RoW	0.000129 kg	0.000425	0.16%
tap water market for tap water - RoW	0.171 kg	0.000212	0.08%

10 minor direct contributors have been omitted for clarity

Anhang 9: Zusatzinformationen zur Sensitivitätsanalyse

In der Sensitivitätsanalyse zur Methodik (Übertragung relativer [%] oder absoluter [kWh] Informationen) wird lediglich der Einfluss vom Strom betrachtet. Dies ist einerseits ausreichend, um die Auswirkungen beider Methodik-Anwendungen zu zeigen und andererseits ist für Strom ein einheitlicher und konkreter Emissionsfaktor ansetzbar. Außerdem wird nur die Herstellungsphase betrachtet. Es werden vier Baustoffe untersucht, welche sich im Einfluss des Strommixes am Gesamt-GWP und in der Differenz zwischen Gesamt-GWP in Ecoinvent und Ökobaudat unterscheiden:

Tab. A 6: Baustoffeigenschaften für die Sensitivitätsanalyse

Baustoff	Anteil des Strommixes am GWP	Differenz zwischen Gesamt-GWP von Ecoinvent und Ökobaudat
Steinzeugfliesen	Hoch (ca. 30 %)	Hoch (Ecoinvent-GWP ist 2,4 mal so hoch wie Ökobaudat-GWP)
Schüttung aus Polystyrolschaumstoffpartikel zementgebunden	Gering (ca. 0,3 %)	Hoch (Ecoinvent-GWP ist 2,6 mal so hoch wie Ökobaudat-GWP)
Calciumsulfatestrich	Hoch (ca. 22 %)	Gering (Ecoinvent-GWP ist 0,85 mal so hoch wie Ökobaudat-GWP)
Zementestrich	Gering (ca. 0,6 %)	Gerin (Ecoinvent-GWP ist 1,1 mal so hoch wie Ökobaudat-GWP)

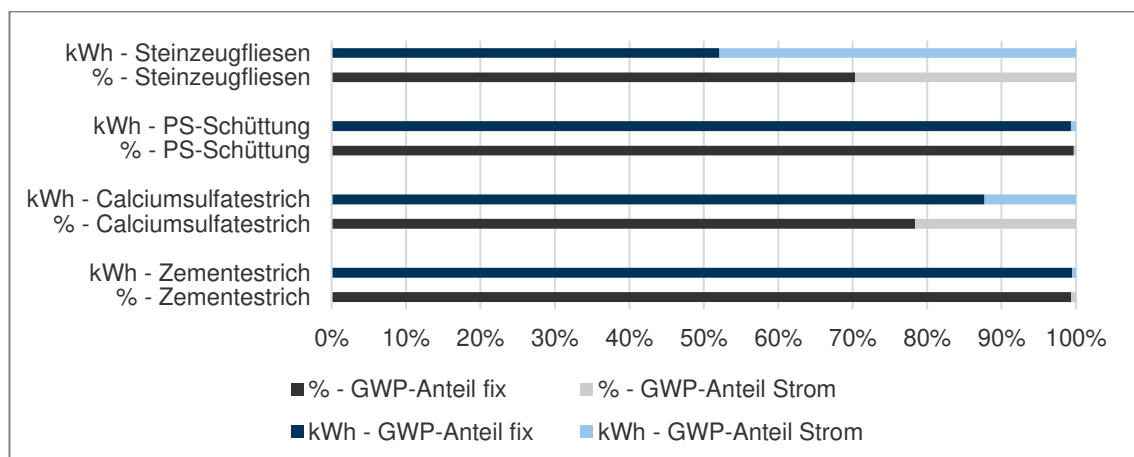


Abb. A 8: Methodik Vergleich zur Implementierung der DLCA

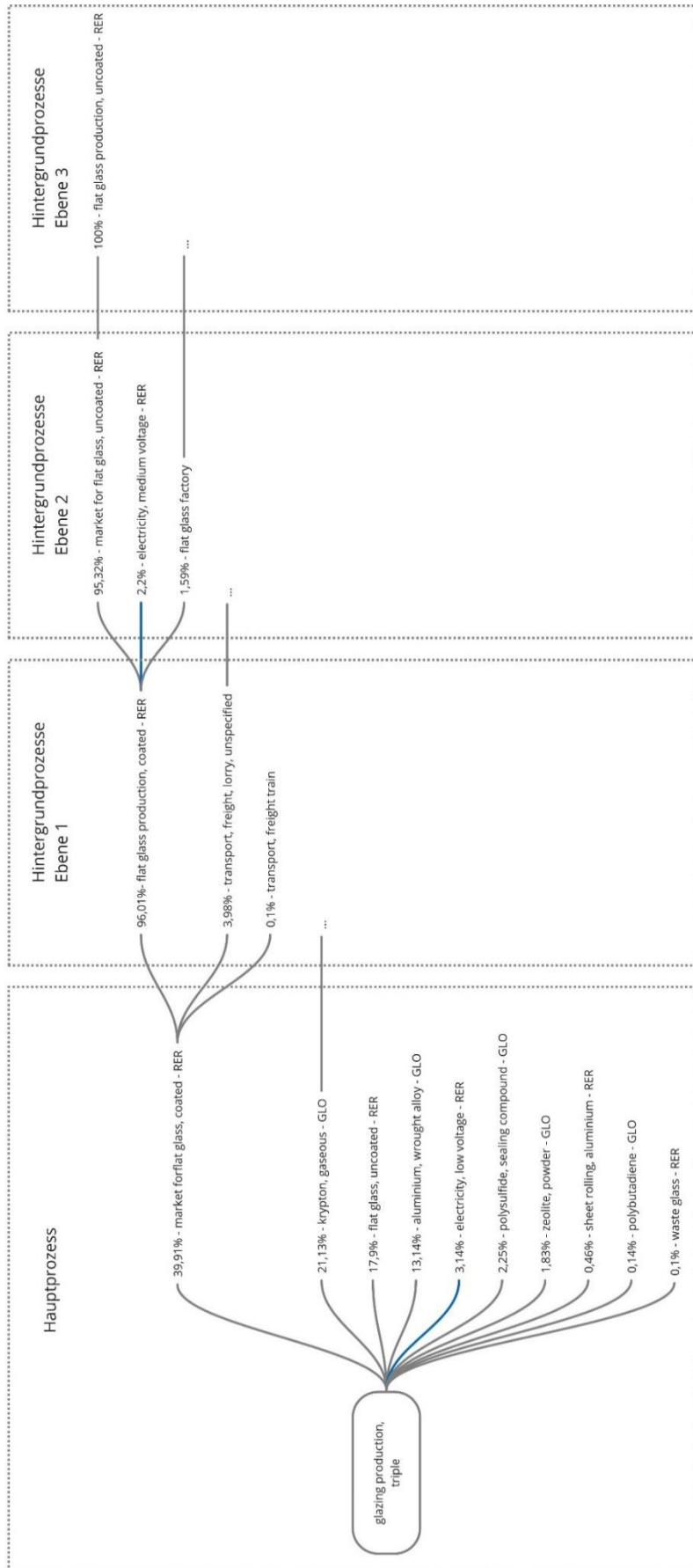


Abb. A 9: Schematische Darstellung der verschiedenen Prozessebenen bei der Herstellung von Dreifachverglasung

Anhang 10: Zusatzinformationen zum CO₂-Budget

Globale Erwärmung zwischen 1850–1900 und 2010–2019 (°C)		Historische kumulative CO ₂ -Emissionen von 1850 bis 2019 (Gt CO ₂)					
1,07 (0,8–1,3; <i>wahrscheinliche Bandbreite</i>)		2390 (± 240; <i>wahrscheinliche Bandbreite</i>)					
Ungefähre globale Erwärmung gegenüber 1850–1900 bis zur Temperaturobergrenze (°C) ^a	Zusätzliche globale Erwärmung gegenüber 2010–2019 bis zur Temperaturobergrenze (°C)	Ermittelte verbleibende CO ₂ -Budgets ab Anfang 2020 (Gt CO ₂)					Variationen bei Minderungen von Nicht-CO ₂ -Emissionen ^c
		<i>Wahrscheinlichkeit, dass die globale Erwärmung auf die Temperaturobergrenze begrenzt wird^b</i>					
		17 %	33 %	50 %	67 %	83 %	
1,5	0,43	900	650	500	400	300	Höhere oder geringere Minderungen von begleitenden Nicht-CO ₂ -Emissionen können die Werte links um mindestens 220 Gt CO ₂ erhöhen oder verringern
1,7	0,63	1450	1050	850	700	550	
2,0	0,93	2300	1700	1350	1150	900	

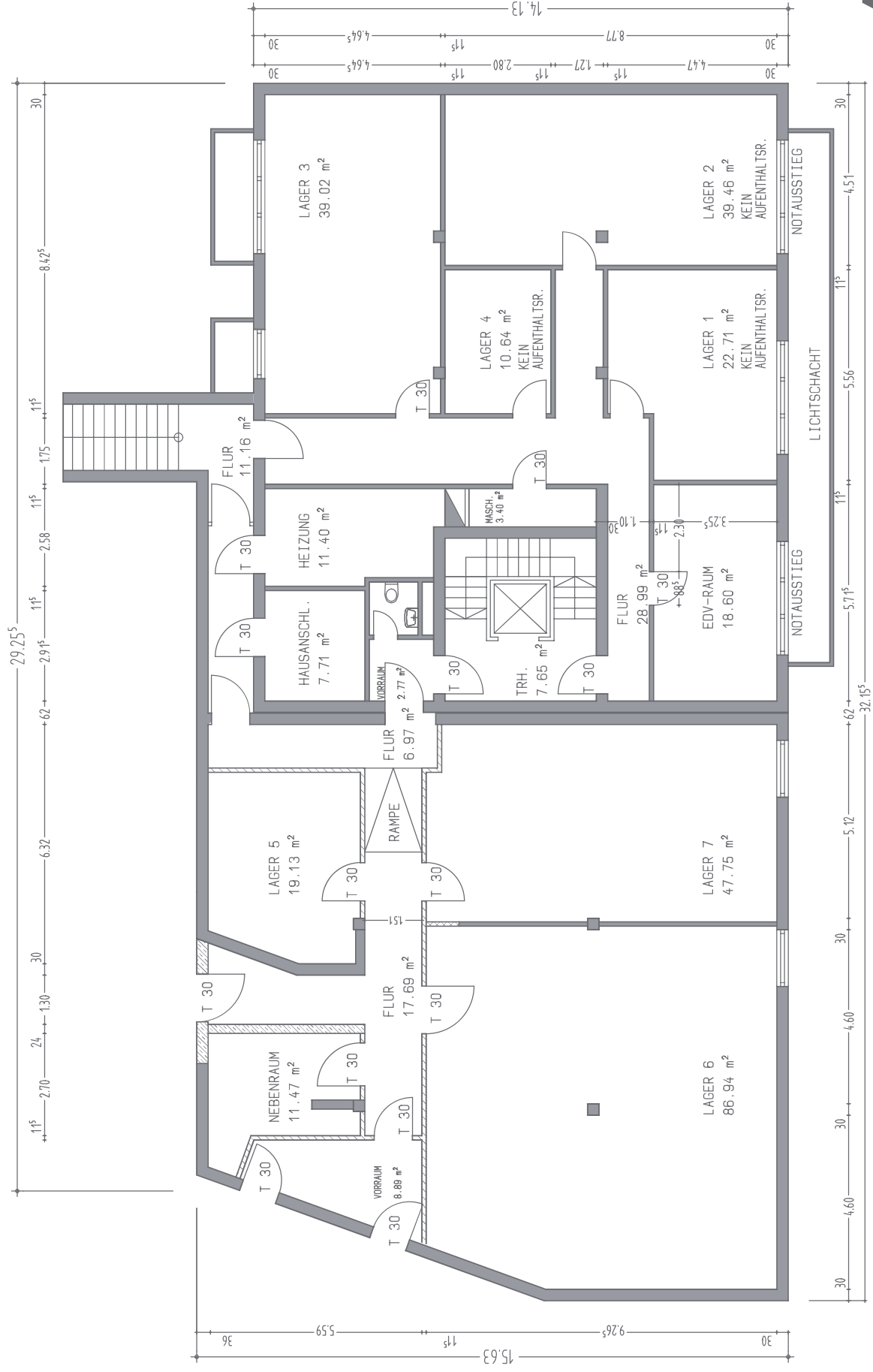
Abb. A 10: Globale CO₂-Restbudgets ab 2020 für verschiedene Klimaschutzziele und Eintrittswahrscheinlichkeiten (Masson-Delmotte et al., 2021, S. 29)

Tab. A 7: CO₂-Restbudgets für Deutschland ab 2023 in Gt CO₂-Äqv.

Grad-Ziel \ Wahrscheinlichkeit der Erreichung des Grad-Ziels	50 %	67 %	83 %
	1,5 °C	2,3	1,4
1,7 °C	5,5	4,1	2,8
2,0 °C	10,0	8,2	6,0

Anhang 11: Plansatz zum Bestandsgebäude und der Sanierungsmaßnahme

Im Folgenden sind die Pläne des Bestandsgebäudes sowie die Sanierungsplanung von *Schankula Architekten* maßstabsgetreu abgelegt.



DEUTSCHER ALPENVEREIN
 GRUNDRISS UNTERGESCHOSS
 BESTANDSGEBÄUDE

M 1 : 150
 05.11.2003

DATUM	NAMEN	ÄNDERUNG/ERWÄNDUNG BETRIFFT:	INDEX

STATIK:
 IB ERBER
 SPINDELSTRASSE 13
 80333 MÜNCHEN
 TEL: 089 76 73 63-00
 FAX: 089 76 73 63-83

H / V / L :
 IB KAUFER + PÄSSER
 SPINDELSTRASSE 2
 80333 MÜNCHEN
 TEL: 089 51 7 81 60-30
 FAX: 089 51 7 81 60-30

ELEKTRO:
 ING Büro emk
 Joseph-Hausstr. 8
 80333 MÜNCHEN
 TEL: 089 76 81 57-30
 FAX: 089 76 81 57-20

BEMERKUNGEN:
 - DIE VEREINBARTE GELTEN NUR IN VERBINDUNG MIT DEN AUSFÜHRUNGSZEICHNEN DER BETEILIGTEN ANFORDERER. FÜR DEN AUSFÜHRUNGSPERSONALISTEN ZU PRÜFEN UND SOWEIT ERFORDERLICH, ÜBERLIEFERN ZU MESSEN.
 - INSTIMMGÄLTEN SIND DEN AUFTRAGGEBER ANWEISUNGSWEISE NUTZUNGSWEISE UND VOR AUFFÜHRUNG MIT DER BAULEITUNG ZU KLÄREN.
 - ALLE MASSE SIND DURCHMESSER, WENN NICHT ANDERS VERMERT.
 - TIEFERLEGUNGEN ERST NACH INSTALLATION AUSFÜHREN.
 - NORMALEGENEN ERST NACH INSTALLATION AUSFÜHREN.
 - ALLE MASSE SIND VOR ORT ZU ÜBERPRÜFEN!
 MATERIALIENANGABEN:

ALZ 1 8/20	ALZ 2 2/20	ALZ 3 2/20	ALZ 4 8/20	ALZ 5 8/20	ALZ 6 8/20	ALZ 7 8/20	ALZ 8 8/20	ALZ 9 8/20	ALZ 10 8/20	ALZ 11 8/20	ALZ 12 8/20	ALZ 13 8/20	ALZ 14 8/20	ALZ 15 8/20	ALZ 16 8/20	ALZ 17 8/20	ALZ 18 8/20	ALZ 19 8/20	ALZ 20 8/20
------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

AUSFÜHRUNGSARTEN:
 - ALZ 1: ALZ 2: ALZ 3: ALZ 4: ALZ 5: ALZ 6: ALZ 7: ALZ 8: ALZ 9: ALZ 10: ALZ 11: ALZ 12: ALZ 13: ALZ 14: ALZ 15: ALZ 16: ALZ 17: ALZ 18: ALZ 19: ALZ 20

AUSFÜHRUNGSARTEN (Fortsetzung):
 - ALZ 21: ALZ 22: ALZ 23: ALZ 24: ALZ 25: ALZ 26: ALZ 27: ALZ 28: ALZ 29: ALZ 30

ERWERB: MB / GK 20.10.03 1:150 W DAV - EG

PLANKINHALT: ERDGESCHOSS

BAUHERR: DEUTSCHER ALPENVEREIN e.V.
 VON-MAHR STRASSE 2 - 4 80997 MÜNCHEN
 TEL: 089 / 1 40 03-0 FAX: 089 / 1 40 03-17

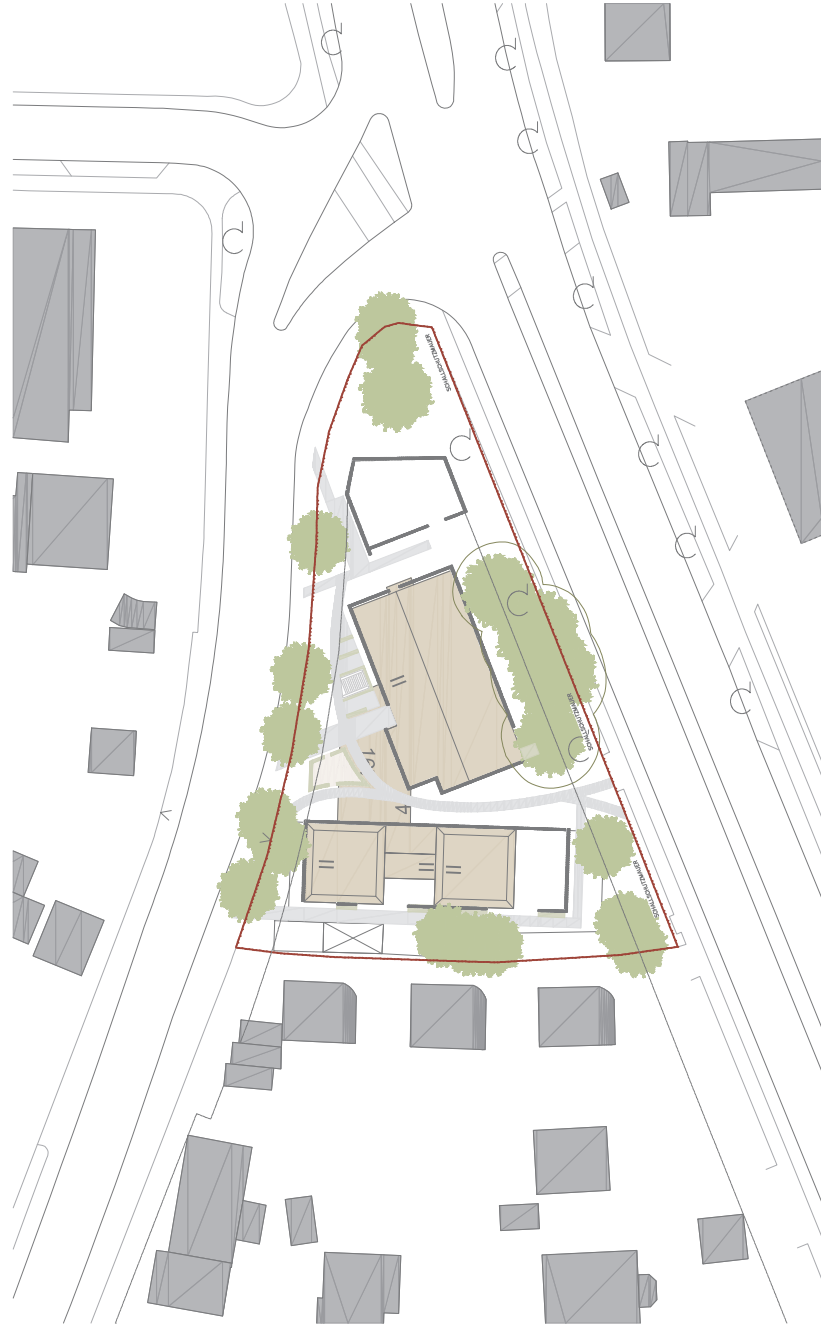
ARCHITEKT: Hauehoffer & Gnadtke
 Architekten - Ingenieure
 Hansstrasse 49 81972 München
 Tel. 089 / 74 33 40 40 Fax. 089 / 760 60 95

PROJEKT: ERWERTUNGSSCHAU DER DAV-BUNDESGESCHÄFTSSTELLE MIT VERWALTUNG UND TIEFGARAGE

PROJEKT: DAV

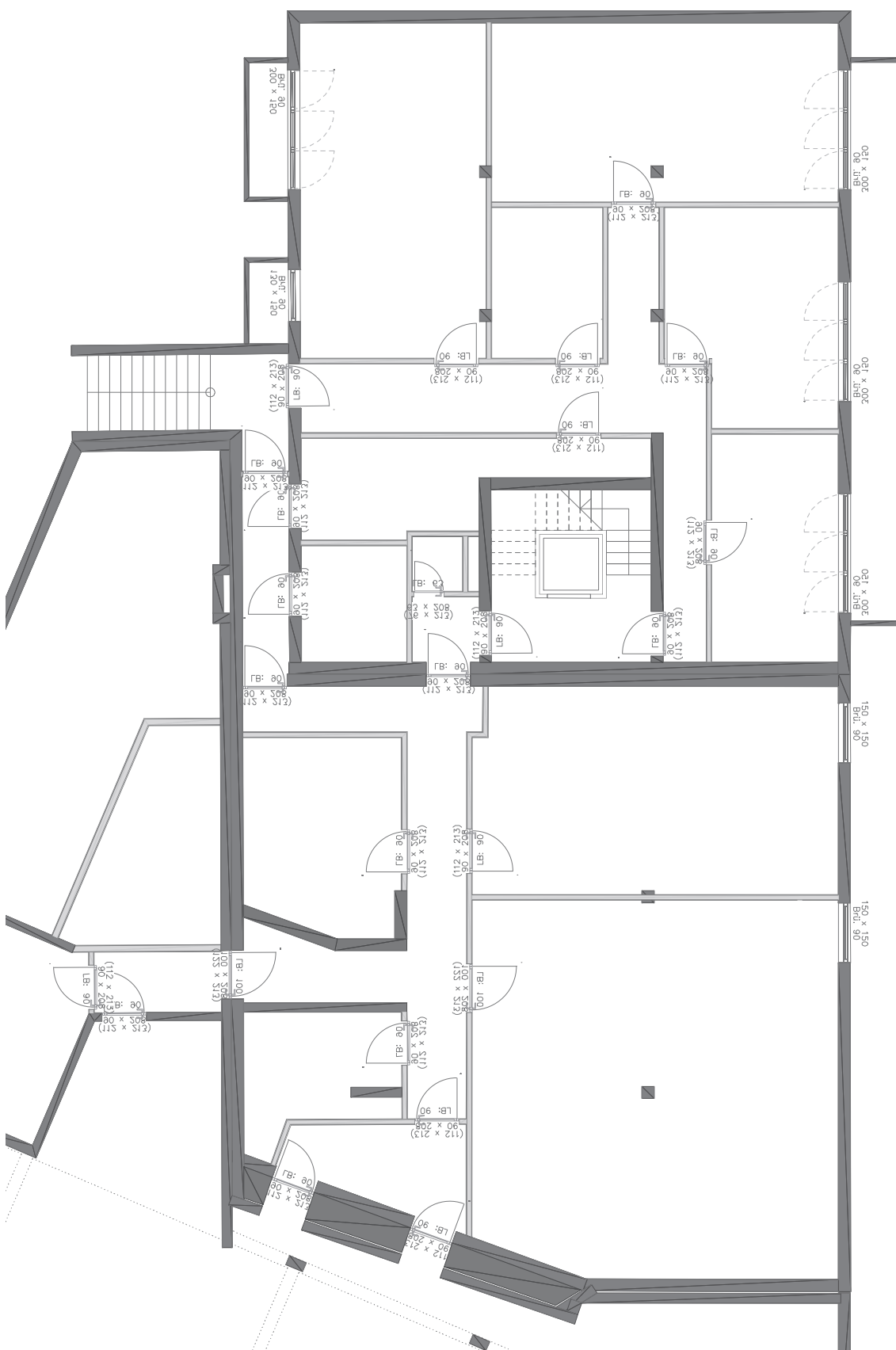


1. VORABZUG



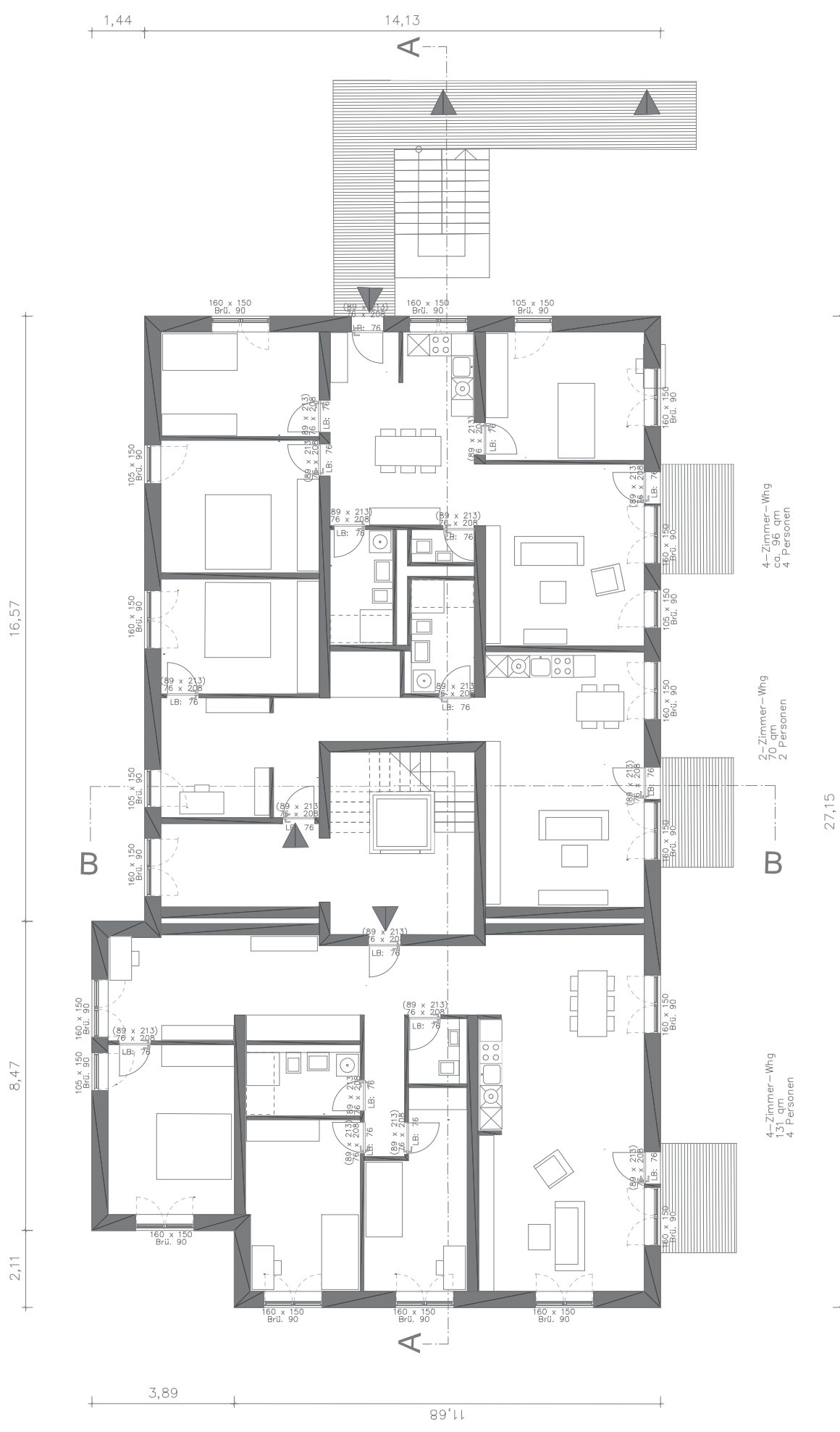
Lageplan
M 1:1000

14,13



32,06

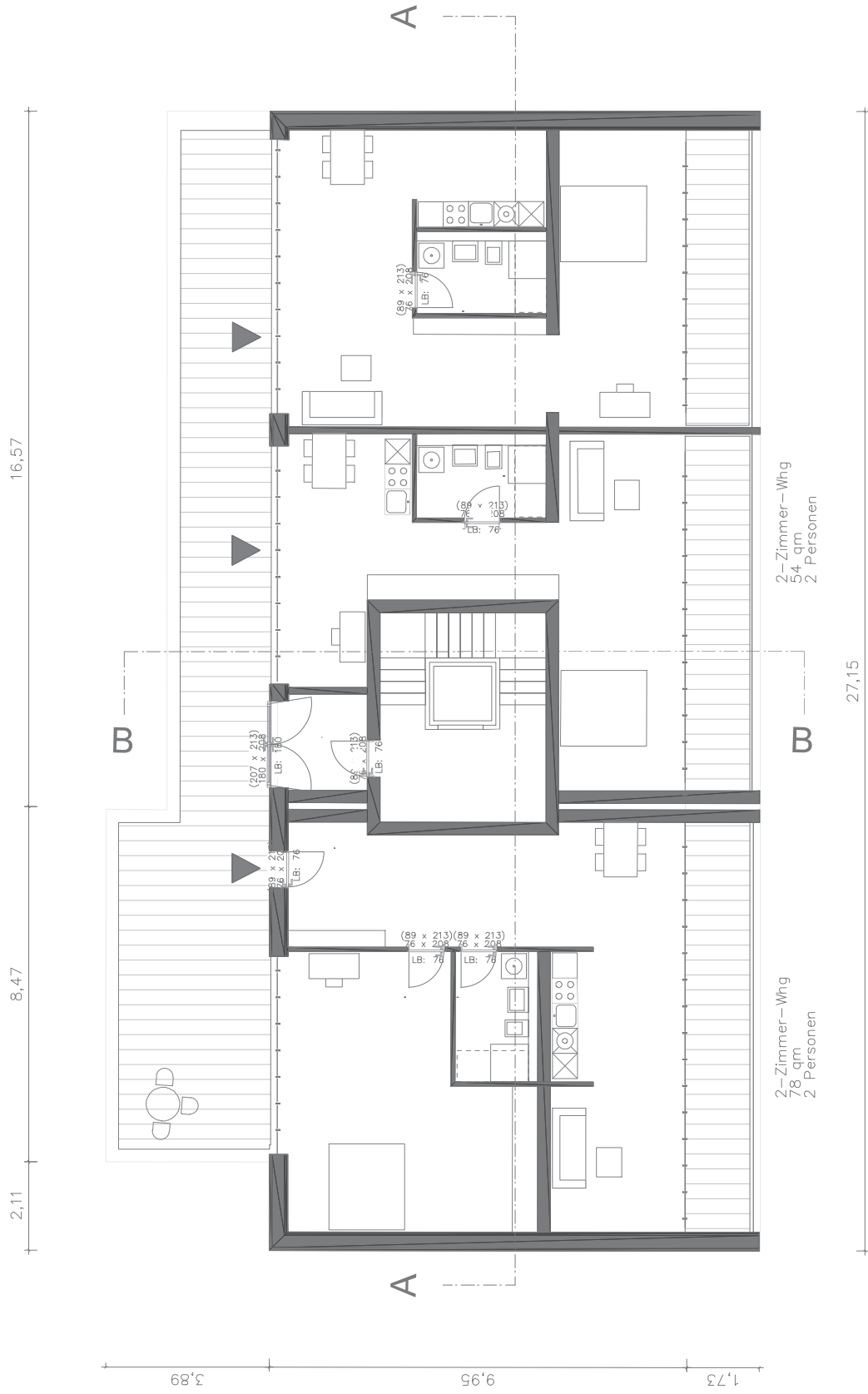
UG
Maßstab 1:50

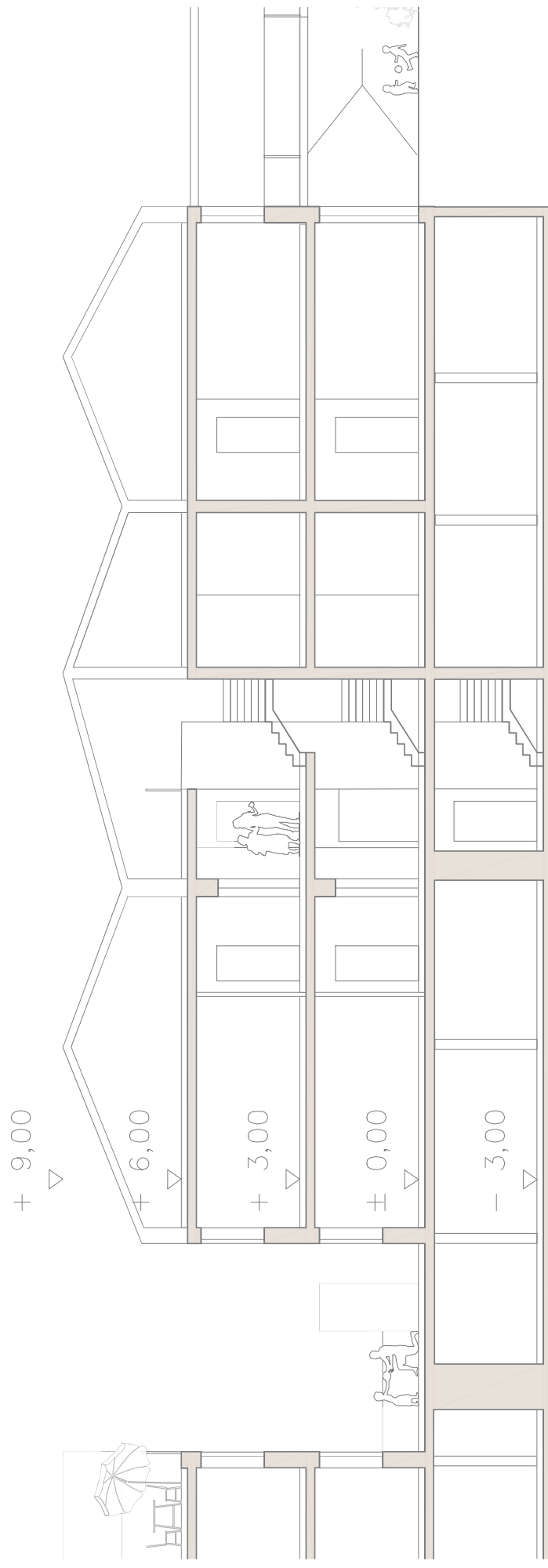


4-Zimmer-Whg
ca. 96 qm
4 Personen

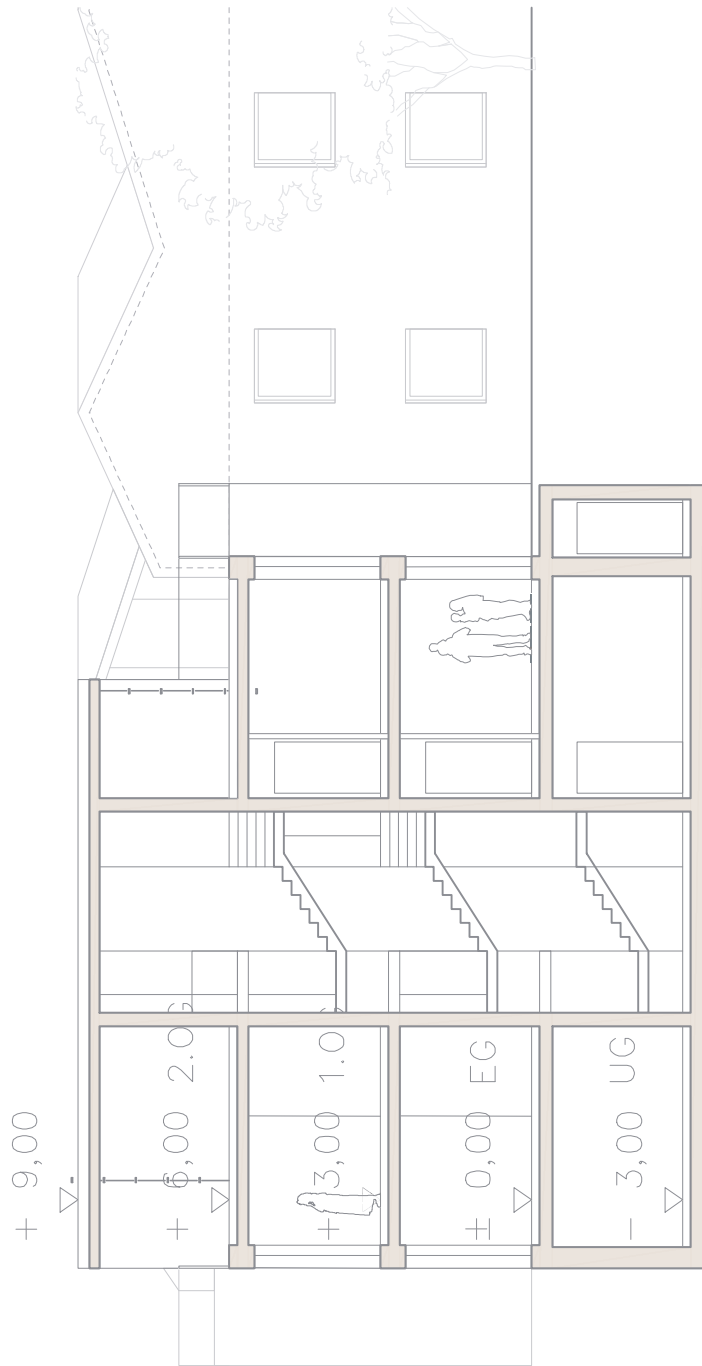
2-Zimmer-Whg
70 qm
2 Personen

4-Zimmer-Whg
131 qm
4 Personen

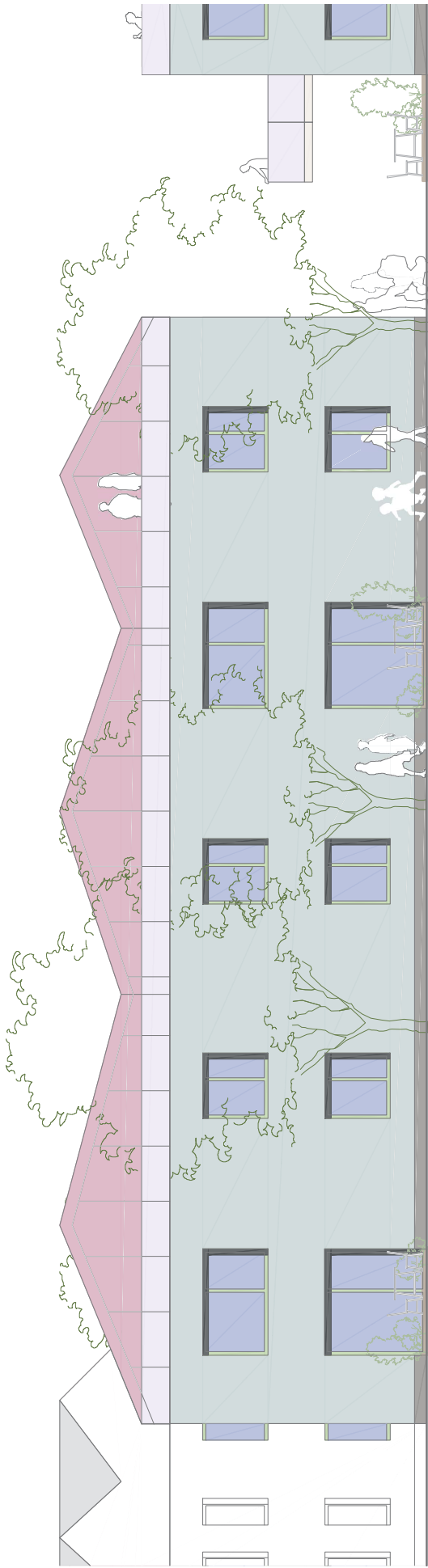




Schnitt A-A
Maßstab 1:150



Schnitt B-B
Maßstab 1:150



Ansicht Süd
Maßstab 1:150