



CO₂-Grenzwertermittlung in der Gebäudezertifizierung auf Basis der ökologischen Tragfähigkeit

Validierung von Budgetwerten an der Ökobilanzierung einer Schulsanierung

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 M.Sc. Leander Präger, M.Sc. Jonathan Woytowicz
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von B.A. Lukas Stöckle
Dorfblick 13
87657 Görisried
+49 176 41766493

Eingereicht am München, den 04.06.2024

Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,
Arcisstraße 21, 80333 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

Herrn Lukas Stöckle

Dorfblick 13
87657 Görisried

– nachfolgend Autorin/Autor –

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

CO2-Grenzwertermittlung in der Gebäudezertifizierung auf Basis der ökologischen
Tragfähigkeit

.....
 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)

Vereinbarung

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 beigefügt. 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 04.06.2024

.....

(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 04.06.2024

Stahl

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Kurzfassung	VII
Abstract	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Glossar	XII
Vorwort und Danksagung	XIII
1 Status quo der Klimawende	1
1.1 Aktuelle Entwicklungen und Relevanz	1
1.2 Zielsetzung der eigenen Arbeit, Hypothese	4
1.2.1 Fragestellung	4
1.2.2 Aufbau der Arbeit	5
2 Rahmenbedingungen	7
2.1 Definition der planetaren Grenzen	7
2.2 Gebäudezertifizierung	8
2.2.1 Grundlagen und Zertifizierungssysteme	8
2.2.2 Top-Down und Bottom-Up	9
2.2.3 Mindestkriterien der DGNB	12
2.2.4 Bestandsgebäude in der Zertifizierung	16
2.3 Definition des Maßnahmenumfangs	17
2.4 Methode Lebenszyklusanalyse der QNG	18
2.5 Rechtliche Grundlagen	23
2.5.1 Klimaschutzabkommen von Paris	23
2.5.2 European Green Deal und EU-Gebäuderichtlinie	24
2.5.3 Deutschland und das Klimaschutzgesetz	25
2.5.4 CO2-Preis	28
2.6 Globale Nachhaltigkeitsziele	28
2.7 Kipppunkte	30
2.7.1 Meereis	31

Inhaltsverzeichnis

2.7.2	Meeresspiegel	32
2.7.3	Korallenriffe.....	32
2.7.4	Monsun	32
2.7.5	Atlantikzirkulation.....	33
2.7.6	Wälder	33
3	Berechnungstool.....	34
3.1	Methode.....	34
3.2	Berechnung des globalen Budgets.....	37
3.3	Berechnung des nationalen Budgets.....	39
3.4	Bauaktivität	42
3.4.1	Budgetzuordnung in der Baubranche.....	42
3.4.2	Gebäudebestand	42
3.5	Nutzungsemissionen.....	43
3.6	Umrechnung des CO ₂ -Budgets in ein Treibhausgasbudget	45
3.7	Berechnung der Szenarien	45
4	Berechnungsbeispiel	48
5	Gebäudebilanzierung der Goetheschule	51
5.1	Sanierung und Neubau der vier Gebäudeteile	51
5.2	Dynamische Lebenszyklusanalyse des Bauprojekts	53
5.3	Graue Energie in Baustoffen.....	55
5.4	Fazit für die Gebäudezertifizierung.....	61
5.5	Gegenüberstellung von THG-Budget und THG-Bedarf.....	62
6	Optimierungsmöglichkeiten.....	64
7	Diskussion und Ausblick.....	65
7.1	Diskussion.....	65
7.2	Fazit und Ausblick.....	67
	Literaturverzeichnis	69
	Abbildungsverzeichnis	77
	Anhang.....	81

Kurzfassung

Mit etwa 40% der weltweiten CO₂-Emissionen (Zimmermann & Reiser, 2021) steht die Baubranche vor einer großen Herausforderung, sich in wenigen Jahren zur Klimaneutralität zu entwickeln. Der menschengemachte Klimawandel kommt durch verstärkte Wetterextreme zum Ausdruck. Erste Kipppunkte und bedrohte Ökosysteme stehen vor irreversiblen Schäden (Calliess, 2023). Die ökologische Tragfähigkeit scheint in einigen Aspekten erschöpft zu sein.

Durch zunehmende Vorgaben und verschärfte Gesetze zeichnen sich bereits positive Entwicklungen ab, jedoch ist ein emissionsfreies Bauen mit aktuellen Standards unmöglich. Vergleichbarkeit in der Performance verschiedener Bauvorhaben schaffen Gebäudezertifizierungssysteme, die sich in Umfang und Gewichtung einzelner Aspekte unterscheiden. Zuteilungen aus dem Klimaschutzgesetz lassen sich bezüglich ihrer Emissionsziele nur bedingt auf Gebäude anwenden, da die Baubranche eine Zusammensetzung aus einigen Sektoren wie der Energiewirtschaft, der Industrie und dem Gebäudesektor darstellt. Diese Arbeit leitet ein verbleibendes CO₂-Budget für die Baubranche in verschiedenen Szenarien her, gleicht dieses mit Zertifizierungssystemen ab und stellt es den Emissionswerten eines Schulbaus gegenüber. Das Gebäudebeispiel belegt die Anwendbarkeit der berechneten Vorgaben, untersucht den Sonderfall einer Sanierung und beleuchtet Stärken und Schwächen der Lebenszyklusanalyse.

Dabei wird für mögliche Entwicklungen ein Tool erstellt, welches der Nachvollziehbarkeit von Verteilung und Berechnung der Treibhausgas-Budgetwerte dient. Es steckt die Grenzen aktueller Tendenzen ab und verifiziert Emissionsprognosen. Potentiale für eine optimierte Realisierung von Baumaßnahmen sollen identifizierbar gemacht werden, um eine Vergleichbarkeit von Alternativen für Entscheidungsträger zu gewährleisten.

Zukünftige Bauemissionen lassen sich im Bereich der energiebedingten Emissionen durch nachhaltige Energiegewinnung teilweise bis zur Emissionsneutralität reduzieren, während prozessbedingte Emissionen eine Zuwendung zu alternativen Materialien oder Kompensationsmaßnahmen erfordern. Welche Einsparmaßnahmen für die Einhaltung des berechneten Restbudgets notwendig sind, wird im Rahmen der Ausarbeitung untersucht.

Abstract

With approximately 40 % of global CO₂-Emissions attributed to the construction industry (Zimmermann & Reiser, 2021), the sector faces a significant challenge to achieve climate neutrality within a few years. Human-induced climate change manifests through increased weather extremes, approaching tipping points, and ecosystems on the brink of irreversible damage (Calliess, 2023). The ecological carrying capacity appears to be exhausted in several aspects. While increasing regulation and stricter laws indicate positive developments, current standards make zero-emissions construction impossible. Building certification systems, which vary in scope and emphasis on different aspects, provide a means to compare the performance of various construction projects. Allocations from climate protection laws can only partially be applied to buildings, as the construction industry comprises several sectors, including energy, industry, and buildings.

This study derives a remaining CO₂-Budget for the construction industry under different scenarios, aligns it with certification systems, and compares it to the emission values of a school construction project. The building example demonstrates the applicability of the calculated guidelines, examines the special case of renovation, and highlights the strengths and weaknesses of life cycle analysis. A tool is developed to facilitate the transparency of greenhouse gas budget distribution and calculation, setting the limits of current trends and verifying emission forecasts. The study aims to identify potentials for optimized construction implementations, ensuring comparability of alternatives for decision-makers.

Future construction emissions can be partially reduced to neutrality in energy-related emissions through sustainable energy production, while process-related emissions require a shift to alternative materials or compensation measures. This work examines the savings required to meet the calculated remaining budget.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Ausführung
Abb.	Abbildung
Äq.	Äquivalent
BayBO	Bayerische Bauordnung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BGF	Bruttogrundfläche
BNB	Bewertungssystem nachhaltiges Bauen
CO2-Äq.	CO2-Äquivalent
CREEM	Carbon Real Estate Monitor
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V.
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive (dt. EU-Gebäuderichtlinie)
EPD	Environmental Product Declaration (dt. Umweltdeklaration)
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KG	Kostengruppe
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz

LCA	Life Cycle Assessment (dt. Lebenszyklusanalyse)
net-zero	dt. Netto-Null, Neutralität
NGF	Nettogrundfläche
ÖKOBAUDAT	Ökobilanz-Datenbank für Baustoffe des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)
PV	Photovoltaik
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
TGA	Technische Gebäudeausstattung
THG	Treibhausgase

Disclaimer zur gendergerechten Sprache:

Im Interesse der Lesbarkeit werden Begriffe wie Architekt, Bauherr, Experten usw. zur allgemeinen Bezeichnung von Personen mit bestimmten Funktionen verwendet. Sie beziehen sich grundsätzlich auf alle Geschlechter.

Glossar

Benchmark	Zielgröße oder Maßstab, der als zu erreichender Wert vorab festgelegt wird und üblicherweise einer regelmäßigen Überprüfung unterliegt. (Lise Hvid Horup et al., 2022)
Graue Emissionen	Indirekt entstehende Treibhausgasemissionen, die durch vorgelagerte Prozesse, graue Energie oder Recyclingverfahren emittiert werden. Im Gebäudebezug beinhalten diese die Gewinnung von Rohstoffen, den Bau und die Instandhaltung sowie Abbrucharbeiten und damit verknüpfte Emissionen. (Weidner et al., 2021a)
Graue Energie	Für die Produktion benötigte Energie, die damit im Material gespeichert wird. Außerdem umfasst die graue Energie auch Herstellung, Transport, Lagerung und Entsorgung. (Zeumer et al., 2009)
Klima(netto)neutralität	Das Gleichgewicht aus ausgestoßenen Treibhausgasemissionen und deren Absorption aus der Atmosphäre. Die Klimanettoneutralität integriert auch Verfahren zur Extraktion von Kohlenstoffdioxid und natürliche Senken. (Luderer et al., 2021)
Konstruktion	Im Kontext der Baubranche bezeichnet die Konstruktion die Herstellung, Errichtung und Sanierung von Gebäuden als Gesamtfeld. Auf Gebäudeebene wird die tragende Struktur eines Bauwerks als Konstruktion bezeichnet. (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2021a)
Treibhausgaspotential / Global Warming Potential	Da verschiedene Treibhausgase sich in ihrer Auswirkung auf die Klimaerwärmung unterscheiden und unterschiedlich schnell abgebaut oder umgewandelt werden, wird deren Wirkungskraft in Relation zu CO ₂ gesetzt und in CO ₂ -Äquivalente (CO ₂ -Äq.) angegeben. (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018)

Vorwort und Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt allen Menschen, die mich bei der Entstehung dieser Abschlussarbeit unterstützt haben.

Zunächst möchte ich mich bei meinen Betreuern an der TUM – Leander Präger und Jonathan Woytowicz – für die inspirierenden Kritiken und den regelmäßigen Austausch bedanken. Mit Geduld und produktiven Diskussionen konnten sie mich stets für die Weiterentwicklung der Arbeit motivieren.

Mein weiterer Dank gilt Mark Daub von Drees & Sommer, der mich an das Thema der Gebäudezertifizierung herangeführt hat und sein Wissen auf der Plattform Builtworld teilt. Außerdem konnte ich mit dem Tool „right.“ einige Ansätze verifizieren, wofür mir Informationen von der Gründerin Hannah Helmke zur Verfügung gestellt wurden.

Danke auch an meine Kommilitonen für die schöne und unvergessliche Zeit während des gemeinsamen Studiums von Beginn des Bachelors an der Technischen Universität München bis zum Abschluss des Masters in Architektur und Ressourceneffizientes und nachhaltiges Bauen.

Zu guter Letzt gilt ein besonderer Dank meinen Freunden für den nötigen Ausgleich und meiner Familie, die mich jederzeit unterstützt und mir das Studium ermöglicht hat.

München, den 04.06.2024

„non nobis – wir handeln nicht für uns allein“ – Werner Sobek

1 Status quo der Klimawende

1.1 Aktuelle Entwicklungen und Relevanz

Im Februar 2024 berichten Medien wie die Tagesschau (2024), dass das 1,5-Grad-Ziel möglicherweise überschritten wurde. So lagen die durchschnittlichen Temperaturen der vergangenen 12 Monate um 1,52 °C über dem vorindustriellen Referenzzeitraum. 2023 war seit Beginn der Aufzeichnungen mit 1,48 °C Erwärmung das bislang wärmste Jahr. Zu Beginn des Jahres 2024 wird im Januar der nächste Rekord verzeichnet, es ist der wärmste jemals aufgezeichnete Januar. Um die natürlichen Lebensgrundlagen zu erhalten, scheint die Reduktion der Klimaerwärmung unumgänglich.

Bereits im Dezember 2023 wurde die erreichte Erwärmung unter Berücksichtigung von Schwankungen mit 1,26°C verzeichnet, was bei gleichbleibender Erwärmung zum Überschreiten des 1,5-Grad-Ziels im Jahr 2033 führen würde (C3S Copernicus Earth Observation Programme, 2023). Die mittlere Erdtemperatur setzt sich aus den Messungen der erdnahen Atmosphäre zusammen, was zu großen Differenzen in einzelnen geografischen Lagen führen kann. Innere Landmassen erwärmen sich demnach schneller, während Meere zu konstanten Temperaturen neigen. Die hohen Temperaturen stehen in Zusammenhang mit den warmen Oberflächentemperaturen der Ozeane, die durch eine hohe Treibhausgaskonzentration und dem El Niño, einem temporären Wetterphänomen, bekräftigt werden (Tagesschau, 2024). Es handelt sich dabei um eine Anomalie der pazifischen Meeresströmungen, die für eine erhöhte Oberflächentemperatur sorgt. El Niño tritt regelmäßig in Abständen von zwei bis sieben, durchschnittlich etwa vier Jahren auf (Latif et al., 2015, S. 490). Die hohen Temperaturen gegenüber dem vorindustriellen Wert, der als Mittelwert der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ermittelt wird, mäßigen sich mit dem Abklingen des El Niños. Nicht zu unterschätzen sind aber die weiterhin hohen Temperaturen als erneuter warnender Hinweis auf einen weit fortgeschrittenen Klimawandel.

Mit zunehmender Erwärmung der Erdatmosphäre drängt sich die Frage auf, ob die Pariser Klimaziele überhaupt noch einhaltbar sind und eine Steigerung der Erdtemperatur von „deutlich unter 2 Grad Celsius“ bzw. mit dem Ziel von nur 1,5 Grad Celsius (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2017) möglich ist. Die Gefährdung einer in Zukunft bewohnbaren Umwelt wurde mitunter von Bewegungen wie „Fridays for Future“ und der „letzten Generation“ weiter in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt und es wurde ein Appell zum schnellen Handeln formuliert. Während Deutschland seine Emissionen bereits reduzieren

konnte, zeigt die weltweite Bilanz einen deutlichen Anstieg (Prater, 2023) gegenüber dem Referenzjahr 1990 (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2017). So werden im Jahr 2023 nach Friedlingstein et al. (2023) Emissionen in Höhe von 40,7 Mrd. t CO₂ durch Menschen verursacht, während die natürlichen Senken davon etwa 23,8 Mrd. t CO₂ binden können, was zu einer Zunahme des atmosphärischen CO₂ von 16,9 Mrd. t CO₂ führt. Innerhalb dieser Senken fallen 13,5 Mrd. t CO₂ auf Landflächen mit deren Wäldern und Mooren neben 10,3 Mrd. t CO₂ auf die Meere zurück. In der Bewertung verbleibender Budgets ist die Aufnahmefähigkeit der Erde in modellierten Berechnungen teilweise bereits integriert (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018), was eine direkte Gegenüberstellung von Budgetwerten und Emissionen erschwert.

Um einer weiteren Steigerung durch Emissionen der Baubranche entgegenzuwirken, sind drastische Maßnahmen nötig. Die Gebäudebranche trägt mit erheblichen Treibhausgasemissionen zum menschengemachten Klimawandel bei. Etwa 38 % der weltweiten CO₂-Emissionen fallen auf die Gebäude- und Baubranche zurück, darunter 8 % auf indirekte und 3 % auf direkte Emissionen der Nichtwohngebäude, 11 % auf indirekte und 6 % auf direkte Emissionen der Wohngebäude. (United Nations Environment Programme, 2020a) In Deutschland resultieren über 40 % der ausgestoßenen Treibhausgase aus Wohn- und Nichtwohngebäuden und deren Erstellung (Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.), 2020, S. 17), weshalb diese Arbeit die aktuell anerkannten Restbudgets verifiziert und an einem gebauten Beispiel Optimierungspotential in der Berechnung einer Lebenszyklusanalyse aufzeigt. 2022 stiegen die weltweiten CO₂-Emissionen gegenüber 2021 um 1 % an, während für das Erreichen des Klimaziels von 1,5 Grad eine Reduktion bis 2030 um 45 % nötig wäre (World Meteorological Organization, 2023). Die Weiternutzung von Bestandsgebäuden mit ihren bereits gebundenen Mengen an CO₂-Emissionen ist daher notwendig, um den Neubau weitmöglichst zu reduzieren. Parallel sind die Aufwendungen für den Betrieb gebauter Objekte zu minimieren. Die Bestandssanierung soll daher mit umfangreichen Strategien optimiert und effizienter gestaltet werden (Hornberg et al., 2019). Nach UN-Generalsekretär António Guterres ist die Welt auf halbem Weg zur Frist der Klimaziele bereits völlig aus der Bahn geraten (World Meteorological Organization, 2023). 2023 sind demnach nur 15 % der Social-Development-Goals (SDG)-Ziele auf einem guten Weg der Erfüllung (World Meteorological Organization, 2023). Wissenschaftliche und technologische Fortschritte stuft der Generalsekretär der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) Prof. Petteri Taalas als wichtiger Treiber zur Erreichung der SDGs ein (World Meteorological Organization, 2023). In der Baubranche, als einer der Hauptakteure der CO₂ emittierenden Branchen, sieht der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) weiterhin ein hohes Verbesserungspotential,

das zwingend ausgeschöpft werden muss (Hornberg et al., 2019). Der globale Gebäudesektor mit Bau und Betrieb war 2020 für 38 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich (United Nations Environment Programme, 2020b).

Um einen Anreiz zur Entwicklung nachhaltiger Gebäude zu bieten, haben sich verschiedene Zertifizierungsmodelle etabliert. Einige Systeme zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, wie beispielsweise DGNB, LEED und BREEAM, bieten gute Grundlagen, um Neubauten, Sanierungen, Innenräume oder Quartiere in einen Vergleich zueinander zu setzen. Es bedarf jedoch einem hohen Aufwand in der konkreten Anwendung der jeweiligen Zertifizierung (Roth, 2011, S. 9). Sie referenzieren meist das gebaute oder geplante Objekt mit einer Alternative nach branchenüblichen Verfahren und bewerten Verbesserungen gegenüber dem Referenzprojekt (Draeger, 2010, S. 52). Die Grundlage ist teilweise abhängig von der Qualität vorhergehender Entwurfs- und Planungsprozesse, in deren Relation Optimierungen unterschiedlich gut umsetzbar sind und es zu verschiedenen Ergebnissen in der Zertifizierung kommen kann. Die Zertifizierungssysteme DGNB, LEED und BREEAM bewerten qualitativ, relativ zum Basis- oder Referenzgebäude, wobei für die Einhaltung der Pariser Klimaziele eine quantitative Bewertung der Bauentwicklungen nötig wäre (Building Material Scout, 2022).

Um die Klimaziele einzuhalten, muss nicht nur das einzelne Gebäude, sondern der gesamte Gebäudebestand mit zukünftigen Entwicklungen betrachtet werden. Die im Betrieb effizienten Gebäude sind nicht zielführend, wenn sie einen hohen Ressourcenverbrauch und große Mengen an grauer Energie mit sich bringen, während ressourcenschonende Gebäude mit niedrigen energetischen Standards in der Nutzung nicht tragbar sind (Weidner et al., 2021c, S. 2). Die meisten Zertifizierungssysteme sind deshalb darauf ausgelegt, eine ausgewogene Bewertung durch die Prüfung vieler Aspekte und einer Lebenszyklusanalyse (LCA) unter Berücksichtigung der grauen Energie in der Erstellung und über den Betrieb bis zum Rückbau zu sichern (Lützkendorf et al., 2009, S. 8). Ähnlich verhält es sich mit der Frage nach dem Sanierungsbedarf des Gebäudebestands. Beste Ergebnisse sollte eine Balance zwischen einer guten thermischen Hülle und dem Bedarf an benötigten Baumaterialien erzielen. Bei der Wahl der Baustoffe ist außerdem auf deren nachhaltige Gewinnung und Herstellung zu achten, um die Gebäude zukunftsfähig zu gestalten (Weidner et al., 2021c, S. 8).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche CO₂-Kapazität in der Baubranche der geografische Bezugsrahmen Deutschland unter Einhaltung der Pariser Klimaziele tragen kann. Der Neubau scheint sich unter diesen ökologischen Aspekten rückläufig zu entwickeln. In welchem Ausmaß und bei welcher Rate der Gebäudebestand saniert werden sollte, wird durch die Ermittlung der CO₂-Grenzwerte in der Ausarbeitung begründet.

1.2 Zielsetzung der eigenen Arbeit, Hypothese

Die Arbeit soll über den aktuellen Stand der Forschung hinaus eine Zuordnung des aktuellen Restbudgets an Treibhausgasen der deutschen Baubranche zuweisen und unter verschiedenen Szenarien mögliche Konsequenzen für eine Überschreitung des Budgets beleuchten. Wie Fuhrhop (2020, S. 32) beschreibt, kann Neubau aufgrund von Ressourcen-, Energie- und Flächenverbrauch kaum als „ökologisch nachhaltig“ bewertet werden. Deshalb wird die Bestandssanierung in Aspekten der Ökobilanz untersucht, während der Neubau auf ein notwendiges Minimum reduziert werden soll. Es wird untersucht, ob die aktuellen Grenzwerte eines Zertifizierungssystems über den errechneten Budgetgrenzwerten liegen, was ein Erreichen der Pariser Klimaziele verhindern kann.

Eine Gegenüberstellung mit einer Beispielssanierung inklusive Erweiterungsneubau soll belegen, inwiefern die aktuelle Praxis den notwendigen Anforderungen gerecht wird. Exemplarisch kann die Bewertung an einem Bildungsgebäude durchgeführt werden. Mit über 30% der kommunalen Gebäudeflächen stellen Schulen einen wichtigen Gebäudetypus dar, der bezüglich des Betriebs, der Sanierung sowie der Instandhaltung hohe Kosten verursacht (Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung, 2013, S. 71). Im Bestand allgemeinbildender Schulen in Deutschland wurden 80 % der Gebäude vor 1978 erbaut (von Hebel et al., 2011, S. 31), was weiterhin einen hohen Sanierungsbedarf mit sich zieht (Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung, 2013, S. 50-51). Den etwa 8 Mio. Schülerinnen und Schülern (Statistisches Bundesamt, 2023) kann das Thema nachhaltiger Gebäude nahegelegt werden und über sie als Multiplikator der „Gebäudetyp Schule“ Vorbildfunktion erlangen.

Sollte die Beweisführung belegen, dass die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens nach aktuellem Baustandard nicht einzuhalten sind, wäre eine Anpassung der Zertifizierungssysteme und des nationalen Rechts zu empfehlen.

1.2.1 Fragestellung

Die grundsätzlichen Fragen und Vorgaben, die der Bewertung einer Kernfrage dienen, werden folgend kurz erläutert. Sie definieren notwendige und aufeinander folgende Schritte im Vorgehen zur Erreichung der Ziele in dieser Arbeit.

F1: Wie viele Treibhausgas-Emissionen dürfen weltweit zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens durch Menschen noch ausgestoßen werden?

F2: Wie hoch ist das Treibhausgas-Budget des deutschen Bausektors und welche Verteilungskriterien sind anzuwenden?

F3: Welche Entwicklungen und nationalen Rahmenbedingungen sind nötig, um ein Restbudget für die Erstellung und Sanierung von Gebäuden bereitzustellen?

F4: Welche Auswirkung hat eine emissionsneutrale Energieversorgung auf die Ergebnisse einer Lebenszyklusanalyse bei einem Beispielgebäude?

Kernfrage: Unter welchen Rahmenbedingungen ist die Sanierung und Erstellung von Gebäuden in Deutschland möglich, ohne die Pariser Klimaziele bezüglich festgelegter Treibhausgasbudgets zu gefährden?

Hypothese: Bei einer Reduktion der energiebedingten Emissionen bis zum politisch angestrebten Jahr 2045 verbleibt für die Baubranche in Deutschland ein positives THG-Restbudget.

1.2.2 Aufbau der Arbeit

Zunächst ist eine Nachverfolgung der Berechnung des Treibhausgasbudgets für Deutschland und innerhalb der nationalen Grenzen notwendig. Gleichzeitig werden äußere Rahmenbedingungen aufgezeigt, die Einfluss auf die Zuordnung nehmen. Das Vorgehen umfasst dabei eine szenarienbasierte Aufteilung und Zuordnung eines Gesamtbudgets, wobei ausgehend von einem großen Maßstab die Untersuchung zunehmend detailliert erfolgt. Am Ende der Budgetberechnung soll ein Wert definiert werden, der in Relation zur Bezugsfläche eines Gebäudes ein zu emittierendes Maximum an CO₂-Emissionen verordnet.

Im darauffolgenden Abschnitt der Arbeit wird die bestehende Lebenszyklusanalyse eines Bauvorhabens untersucht und mit den bereits erlangten Erkenntnissen überarbeitet, um in einer dynamischen Betrachtung das Projekt anhand einer zeitlichen Verschiebung zu bewerten. Demzufolge werden an Reduktionspfaden Potentiale erarbeitet, welche für zukünftige Bauprojekte eine realistische Einschätzung bezüglich ihrer Emissionswerte treffen.

Eine Gegenüberstellung der beiden Berechnungen zeigt, inwiefern zukünftige Bauten im Sinne der heutigen Materialität mit aktuellen Anforderungen einer zielorientierten CO2-Budgetierung standhalten können und ob eine Konformität möglicher verschärfter Regularien gegeben wäre. Das Ergebnis soll als Grundlage für eine weitere Definition von Zertifizierungskriterien dienen, die über zeitliche Stufenpläne in dynamischen Modellen die Top-Down-Kriterien integrieren.

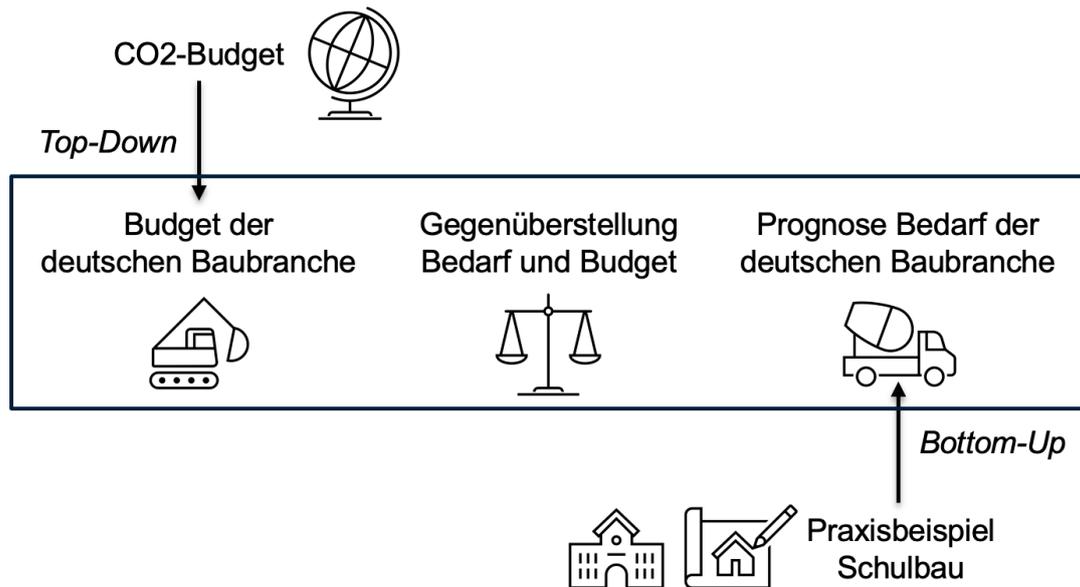


Abbildung 1 Methodik und Aufbau zur Beantwortung der Forschungsfrage (eigene Darstellung)

2 Rahmenbedingungen

2.1 Definition der planetaren Grenzen

Eine nachhaltige Entwicklung ist nach Hauff et al. (2018, S. 46) nur gegeben, „wenn sie die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre Bedürfnisse nicht befriedigen können“. Deshalb werden Kennzahlen benötigt, um eine zukünftige Bedürfnissicherstellung zu gewährleisten. Für die Einführung von Grenzwerten werden die planetaren Grenzen genannt, die jedoch in vielen Aspekten auf Annahmen beruhen und einer Definition bedürfen. Grundsätzlich sollte nach Calliess (2023, S. 140) vermieden werden, dass „schwerwiegende und irreparable Schädigungen für Mensch und Umwelt“ entstehen, weshalb für die komplexen Aspekte über „das Vorsorgeprinzip eine Beweislastumkehr in Form einer wissenschaftsbasierten widerleglichen Gefährlichkeitsvermutung“ gefordert wird. Seit dem 20. Jahrhundert sind einige Entwicklungen zu verzeichnen, die eine Bedrohung für das sonst stabile System Erde darstellen. Neben dem Aussterben von Pflanzen und Tierarten, Rodungen von Waldflächen und einem exponentiell steigenden Wasserverbrauch ist das Freisetzen von Schadstoffen und Verschmutzungen durch die Menschheit verantwortlich für häufiger auftretende Wetterextreme (Gerten, 2020, S. 64). Ein Zielsystem verfolgt die Methode des Top-Down-Ansatzes, die darin besteht, die Argumentationskette ausgehend von übergeordneten Zielen offenzulegen (Roth, 2011, S. 10). Anhand der „TOPSIS-Methode“ beschreibt Roth (2011, S. 40), dass verschiedene Wege und Maßnahmen gegeneinander gewichtet werden, wenn sie zum gleichen Ziel führen. So können beispielsweise eine gute Luftqualität, definierte Temperaturen und das Abwenden von Extremwetterereignissen als Ziel für die menschliche Gesundheit gefordert werden. Ein Kriterium für diese Aspekte ist der CO₂-Gehalt der Atmosphäre, welcher innerhalb kritischer Grenzen gehalten werden muss. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (2022, S. 9) beantwortet die Frage nach dem aktuellen Restbudget an CO₂-Emissionen für Deutschland mit fünf Rechenschritten, wodurch jedes Land sein eigenes, absolutes Budget ab 2016, abzüglich bereits verbrauchter Mengen, bestimmen kann. Die Rechenschritte werden als Teil der Berechnungsmethode im Kapitel 3 „Berechnungstool“ weitergehend erläutert.

2.2 Gebäudezertifizierung

Während der Planungs- und Bauphase werden einige Nachweisgrößen in der Baubranche zur Kontrolle genutzt, ob vereinbarte Merkmale erfüllt werden. Nach Erfordernis wird mit Maßnahmen dem Abweichen von Zielpfaden entgegengewirkt. Zertifizierungen erfordern klare Zielvorgaben und eine kontinuierliche Überprüfung, ob die Anforderungen erfüllt werden. In jedem System gibt es einige Kennzahlen, die von Bedeutung sind. Einige Zertifizierungen beinhalten auch einen Grenzwert für CO₂-Emissionen oder Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq.), um den Ausstoß an Treibhausgasen zu limitieren.

2.2.1 Grundlagen und Zertifizierungssysteme

Weltweit hat sich eine Vielzahl an Systemen und Normen bezüglich der Gebäudebewertung etabliert. Sie variieren in Gewichtung und Umfang der Betrachtungskriterien. Teilweise werden die Systeme von ihren Herausgebern fortlaufend überarbeitet und an aktuelle Forschungsergebnisse oder Entwicklungen angepasst. Teilweise erfahren folgende Zertifizierungen und Normen Beachtung in der weiteren Untersuchung.

- LEED (Leadership in Energy and Environmental Design): von US Green Building Council (USGBC) entwickelt; bewertet Umweltkriterien (Freitas & Zhang, 2018, S. 403-406)
- BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method): in Großbritannien entwickelt; ökologische, soziale und wirtschaftliche Kriterien; berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus (Freitas & Zhang, 2018, S. 403-406)
- DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen): private deutsche Organisation; Kriterien wie Ökologie, Ökonomie, soziokulturelle und funktionelle Aspekte (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2021b, S. 3-4)
- BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen) früher mit DGNB vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) entwickelt; Anwendung für öffentliche Bauvorhaben in Deutschland, Kriterien ähnlich der DGNB und zwischenzeitlich gemeinsame Weiterentwicklung (Roth, 2011, S. 76,77)
- ISO 21931: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden; Rahmen für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, Grundlage

für die Entwicklung nationaler Standards für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden (International Organization for Standardization, 2022)

- EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung des Lebenszyklus von Gebäuden: Anforderungen für die Bewertung der Umweltleistung von Gebäuden während des Lebenszyklus (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021)

2.2.2 Top-Down und Bottom-Up

Zuvor genannte Zertifizierungen ähneln sich hinsichtlich der Erarbeitung von Referenz- und Grenzwerten für die Treibhausgaswerte, welche in einem Bottom-Up-Prinzip ermittelt werden. Näher wird die Unterscheidung zwischen den Herangehensweisen Bottom-Up und Top-Down von Gervasio et al. (2018) erläutert.

Die Bottom-Up-Methode betrachtet bereits gültige Anforderungen und sieht vor, diese sukzessiv zu verschärfen oder fordert neue Anforderungsniveaus in Relation zu bestehenden Werten. Für eine Gewährleistung der technischen Realisierbarkeit werden bereits gebaute Beispiele herangezogen, die als fortschrittlich im Hinblick auf das untersuchte Kriterium gelten (Lise Hvid Horup et al., 2022). Daraus entwickeln sich Kennzahlen und Mindestanforderungen, die bei Unterschreitung in Punktesystemen quantitativ bewertet werden. Da in Deutschland bislang keine Verpflichtung zur Erstellung einer Ökobilanz bei Bauvorhaben besteht, ist eine übergreifende Methode nur mit begrenzten Datensätzen möglich. Beispielsweise wurde von der One Click LCA Ltd (2021) eine Studie veröffentlicht, die aus über 15.000 Datensätzen nach EN 15978:2011 in Europa 3.737 validierte Objekte gefiltert hat und nach der Level(s)-Methode die Phasen A1-A4, B4-B5 and C1-C4 bilanziert. Folgende Referenzwerte ergeben sich aus der Auswertung dieser Studie über einen Lebenszyklus von 50 Jahren für die 5 Kategorien: Kommerzielle Gebäude, Bildungsbauten, Industrie, Büro, Wohnen.

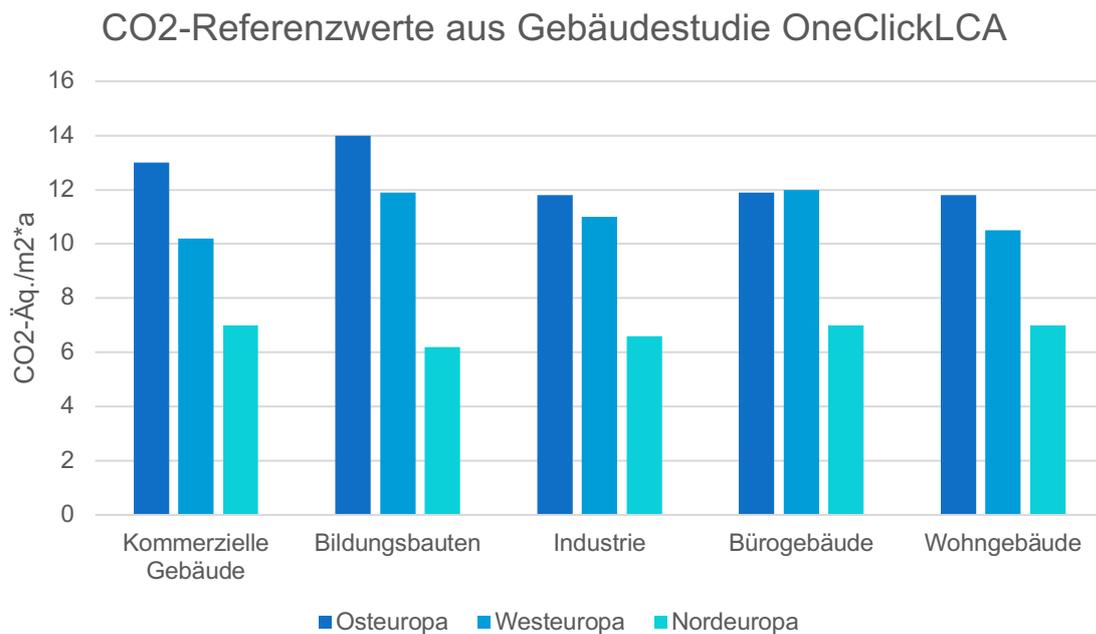


Abbildung 2 CO₂-Referenzwerte auf Basis der Werte einer OneClickLCA-Gebäudestudie (eigene Darstellung) (One Click LCA Ltd, 2021)

Bei der Top-Down-Methode, welche in der weiteren Arbeit Anwendung findet, wird ein Gesamtrahmen festgelegt, der in einer absoluten Bilanz nicht zu überschreiten ist. Innerhalb der Grenze können Verschiebungen und Ausgleichsmaßnahmen zulässig sein. Beispielsweise wurden im Klimaschutzgesetz (KSG) der Bundesregierung einzelne Sektoren definiert, die jeweils Zielbudgets einzuhalten haben und bei Überschreitung zu Sofortmaßnahmen gezwungen werden (Bundesregierung, 2019). Mit einer überarbeiteten Version des KSG sollen die Sektoren ein Gesamtbudget einhalten und von ihren Einzelzielen freigestellt werden, um Probleme in der Verteilung zu überbrücken. Der Top-Down-Ansatz gibt demnach ein Maximalbudget vor, das durch Einzelmaßnahmen einzuhalten ist. Inwiefern die Realisierung technisch oder wirtschaftlich möglich ist, wird außer Acht gelassen. Eine Reduktion kann zur Überprüfung und Kommunikation von Leitlinien außerdem an Zwischenziele sowie einen Zeitplan gebunden werden. Ein Ausgleich von Überschreitungen wird durch Absorptionsmaßnahmen möglich, sofern geeignete Technologien zur Verfügung stehen. Während einige veröffentlichte Grenzwerte sich auf ein Jahr innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums beziehen, scheint die Veröffentlichung von absoluten Werten in der Lebenszyklusanalyse geeigneter zu sein (Lützkendorf, 2023). Große Mengen an Emissionen, die direkt bei der Erstellung des Bauwerks auftreten (upfront), werden dabei nicht auf spätere Zeitpunkte verlagert. Aus dem Austausch oder der Instandhaltung resultierende Emissionen können demgegenüber durch später etablierte Kompensationen bewältigt werden. Eine

differenzierte Betrachtung der Zeitpunkte anfallender Umweltbelastungen liefert die Möglichkeit, eine dynamische Budgetberechnung durchzuführen.

Auf Basis der vorgefundenen Kriterien und Grenzwerte werden in Verbindung mit den UN-Klimazielen für nachhaltige Entwicklung Budgets und Grenzen aufgezeigt, die anschließend als Referenzwerte des Zertifizierungssystems dienen können. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grenzwerte der LCA für CO₂-Emissionen untersucht und sollen repräsentativ für andere Umweltwirkungen stehen. Wie die Methode konkret anzuwenden ist, wird an einer Beispielsanierung überprüft. Verbesserungspotentiale in der Anwendbarkeit des entwickelten Systems werden in einem iterativen Prozess entwickelt.

Es gibt einige Aspekte der Zertifizierung, die in dieser Arbeit nicht umfänglich betrachtet werden und eine ähnliche Top-Down Bewertung erfahren können:

- Bildungspotential für troposphärisches Ozon (POCP)
- Summe nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)
- Energieverbrauch: Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus: für Bau, Betrieb und Demontage; Ziel: Senkung des Energieverbrauchs unter beispielsweise 100 Kilowattstunden pro Quadratmeter Gebäudefläche/Person/Personentage pro Jahr.
- Wasserverbrauch: Menge Wasserverbrauch, direkt und indirekt mit dem Gebäudebetrieb verbunden; Ziel: Reduzierung des Wasserverbrauchs unter 100 Liter pro Person pro Tag. Der tatsächliche Verbrauch ist verhaltensbasiert!
- Flächenverbrauch: Der Flächenverbrauch eines Gebäudes in Bau und Betrieb
Ziel: Begrenzung des Flächenverbrauchs unter einer definierten Anzahl an Quadratmetern pro Nutzer/pro Personentage des Gebäudes. Die Bewertung ist an eine Gebäudenutzung gebunden und spiegelt den Suffizienzansatz wider.

In einem Top-Down-Verfahren wird von Weidner et al. (2021a) der umbaute Raum als Referenzgröße gewählt. Die Studie errechnet unter der Annahme einer konstanten Neubauaktivität unter Rückgriff auf Budgetwerte ab 2020 einen Grenzwert von 32,2 kg CO₂/m²*a für den Neubau. Hier wird angenommen, dass die Neubaubranche in Deutschland für etwa 10 % der inländischen CO₂-Emissionen verantwortlich ist. Die Schwierigkeiten einer Top-Down-Ermittlung beleuchten Lise Hvid Horup et al. (2022) in einer Zusammenfassung bereits angestellter Versuche, ein Budget für die Baubranchen zu berechnen. Sie zeigen auf, dass veraltete Budgetwerte, wie die Angaben des IPCC, sich über Jahre hinweg unsicher entwickeln und stetige Neuberechnungen nötig wären.

Außerdem merken sie an, dass die Budgetzuordnung der Sektoren problematisch ist, wie die Baubranche in ihrer Unterteilung in Hochbau und Straßenbau bei der Zementherstellung Ungenauigkeiten aufweist und teilweise graue Emissionen (Scope 2-3) übersehen werden.

2.2.3 Mindestkriterien der DGNB

Für den Vergleich von Referenzwerten soll ein Zertifizierungssystem herangezogen werden, welches bereits große Verbreitung gefunden hat und allgemein anerkannt wird. Von einigen Zertifizierungsanbietern wird ein Kriterienkatalog bereitgestellt, der die einzelnen Anforderungen beschreibt. Je nach Umfang der Auseinandersetzung können Zertifizierende mit eigenen Tools die Arbeit unterstützen und selbst Auswertungen anstellen. Die DGNB veröffentlicht Tabellen, die in eigenen Programmen eingesetzt und zur Nachvollziehung der Berechnungen genutzt werden, wobei das zentrale Werkzeug ein Kriterienkatalog ist, der über Gewichtungprofile Anwendung findet (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2021b). Die DGNB vollzieht in Deutschland über 80 % der Gebäudezertifizierungen für Neubau und mehr als 60 % der Bewertungen im Gesamtmarkt, während sie für Quartierszertifizierungen europaweit führend ist. (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023b)

Das System gliedert die Zertifizierungen in Platin, Gold, Silber und Bronze, wobei Bronze nur für Gebäude im Betrieb oder Altbestand anwendbar ist. Für die Auszeichnung müssen Gesamterfüllungsgrade eingehalten werden und in jeder der drei Hauptsäulen wird ein Mindesterfüllungsgrad als Voraussetzung gestellt. Außerdem wird die Auszeichnung Diamant für gestalterische und baukulturelle Qualität vergeben, ist aber nicht Teil der weiteren Betrachtung.

				
	PLATIN	GOLD	SILBER	BRONZE*
Gesamterfüllungsgrad	ab 80%	ab 65%	ab 50%	ab 35%
Mindesterfüllungsgrad	65%	50%	35%	— %

Abbildung 3 DGNB Zertifizierungsstufen und Erfüllungsgrade (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023b)

Im Gegensatz zur Version von 2018 wurde die Gewichtung der Kriterien überarbeitet. Es werden die Kriterien der DGNB bezüglich ihrer Mindestanforderungen genauer untersucht. Statt ehemals 22,5 % fließen in der Version 2023 die Kategorien Ökologie, Ökonomie und Soziokulturelles gleichgewichtet mit jeweils 25 % in die Bewertung ein. Die Anteile von technischer (vormals 12,5 %) und prozessualer (vormals 15 %) Qualität wurden jeweils auf 10% reduziert. Die Standortqualität wird gleichbleibend mit 5 % beachtet.

Als Teil des Kataloges zur Gebäudezertifizierung wurden einige Kriterien zur verpflichtenden Einhaltung definiert. Zusätzlich werden an Gebäude mit der angestrebten Auszeichnung „Platin“ weitere Grundvoraussetzungen gestellt.

Die Version 2023 stellt an Neubauten 8 Mindestanforderungen aus den drei Hauptsäulen für eine erfolgreiche Zertifizierung (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023a). Überwiegend ökologische Anforderungen werden für das Platinzertifikat zusätzlich verpflichtend oder verschärft.

Für alle Gebäude gelten folgende Anforderungen:

Mindestanforderungen ökologische Qualität:

- ENV1.1 – Indikator 2.1.1 – Offenlegung der Lebenszyklusbilanzen nach vereinfachtem Verfahren
- ENV1.1 – Indikator 2.4.1 – Klimaschutzfahrplan Klimaneutraler Betrieb – Zieljahr gemäß nationaler Ziele
- ENV1.3 – Indikator 2.2.1 – Einsatz verantwortungsvoll gewonnener Produkte

Mindestanforderungen ökonomische Qualität:

- ECO2.6 – Indikator 2.3 Grundresilienz gegenüber Elementarschäden

Mindestanforderungen soziokulturelle und funktionale Qualität:

- SOC1.2 – Indikator 1.1 – Messung flüchtiger organischer Verbindungen
- SOC2.1 – Indikator 1 – Qualitätsstufe 1

Mindestanforderungen technische Qualität:

- TEC1.6 – Indikator 3.3 – Umnutzungs-, Umbau-, und Rückbauanleitung

Mindestanforderungen Prozessqualität:

- PRO2.3 – Indikator 1 – Technisches Monitoring in der Planungsphase

Mindestanforderungen Standortqualität:

- SITE1.1 – Indikator 1 – Durchführung einer Klimaaanalyse

Für das Platinzertifikat werden folgende Kriterien vorausgesetzt:

Ökologische Qualität:

- ENV1.1 – Indikator 2.4.2 – „Ambitionierter Klimaschutzfahrplan“ Klimaneutraler Betrieb
- ENV1.2 – Indikator 1 – Umweltverträgliche Materialien
- ENV2.2 – Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen
- ENV2.4 – Indikator 2 – Lebensraum

Ökonomische Qualität:

- ECO2.6 – Indikator 2.1.2 – Umsetzung wesentlicher Maßnahmen zur Reduktion aller hohen

Soziokulturelle und funktionale Qualität:

- SOC1.2 – Indikator 1.1 – Messung flüchtiger organischer Verbindungen

Technische Qualität:

- TEC1.4 – Indikator 5.2.1 – Erzeugung erneuerbarer Energien am Gebäude
- TEC1.6 – Indikator 1.3.1 – Begründung und Planung des Rückbaus
- TEC3.1 – Mobilitätsinfrastruktur

Prozessqualität:

- PRO2.3 – Indikator 5 – Technisches Monitoring in der ersten Nutzungsphase

Standortqualität:

- SITE1.1 – Indikator 1 – Durchführung einer Klimarisikoanalyse

Das für die Ökobilanzierung relevante Kriterium ENV1.1 Klimaschutz und Energie beschreibt folgendermaßen den Ziel-, Referenz- und Grenzwert. Die Punktebewertungen sind linear interpolierbar. (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023a, S. 40)

- Oberer Zielwert = $0,5 * \text{Referenzwert}$ (70 Punkte + 5 Punkte Indikator 2.3.1)
- Zielwert = $0,75 * \text{Referenzwert}$ (60 Punkte)
- Referenzwert (50 Punkte)
- Grenzwert = $2,25 * \text{Referenzwert}$ (0 Punkte)

Dabei wird der Referenzwert projektspezifisch ermittelt.

Nach Indikator 1.1.1 soll bereits in einer frühen Planungsphase ein Modell für die Ökobilanz erstellt werden, das unterstützend zu Entscheidungen zugezogen wird. Verschiedene Varianten werden qualitativ oder quantitativ hinsichtlich ihres GWP untersucht. Emissionen sollen über den gesamten Lebenszyklus inklusive des Betriebs beachtet und in den Varianten gegenübergestellt werden.

Die anzuwendenden Varianten für den Betrieb werden im Kriterienkatalog definiert, wovon mindestens zwei berechnet werden.

- Hoher energetischer Standard
- Netto-Treibhausgasneutraler Betrieb oder "ready for CO2-neutraler Betrieb"
- Reduktion der Bedarfe = Suffizienz-Standard.

Unter den vorgegebenen Varianten für das Bauwerk sind mindestens drei zu evaluieren.

- Optimierter / reduzierter Einsatz von Materialmengen / Leichtbau,
- Einsatz von CO2-reduzierten Materialarten / Werkstoffen,
- Optimierter / reduzierter Einsatz von Gebäudetechnik,
- Zirkuläre Bauweise mit Betrachtungen der Vornutzungs- und Nachnutzungsphase,
- Langlebigere Gebäude-Nutzungsdauer und optimierte Bauteilnutzungsdauern.

Die Berechnung muss mindestens nach dem vereinfachten Verfahren der Ökobilanz-Bilanzierungsmethode durchgeführt werden. Zur Veröffentlichung muss neben der Fläche eine weitere Bezugsgröße berechnet werden, wie beispielsweise „pro Nutzende“. Weitere Umweltindikatoren werden detailliert der DGNB vorgelegt. Das bislang kaum berücksichtigte Suffizienzverhalten kann als mögliche Alternative zum Flächenbezug herangezogen werden.

Der Bilanzrahmen des Bauwerks bezüglich fossiler Treibhausgase in der Herstellung (Module A1-A3) ermöglicht weitere Punkte in Indikator 2.5.

- Oberer Zielwert (20 Punkte + 2,5 Punkte in Indikator 2.5.2)
- Zielwert (10 Punkte)
- Referenzwert (5 Punkte)
- Grenzwert (0 Punkte)

Unterschreitungen der Ziel- und Referenzwerte weiterer Umweltindikatoren lassen zusätzliche Punkte für die Zertifizierung zu, wodurch die Gesamtbewertung verbessert wird.

2.2.4 Bestandsgebäude in der Zertifizierung

Für den Gebäudebetrieb wird eine Strategie angestrebt, die Flexibilität im verbleibenden Bedarf bietet, da eine Autarkie aller Gebäude als nicht zielführend erscheint. Außerdem muss der verbleibende Energiebedarf nachhaltig gedeckt werden, wozu ein Ausbau der grünen Energie von Seiten der Energielieferanten konsequent verfolgt werden soll (Bouckaert et al., 2021). Für einen ganzheitlichen Überblick über die Zusammensetzung und baulichen Gegebenheiten des deutschen Immobilienbestands wird der Dena-Gebäudereport von Becker et al. (2022) herangezogen, der aktuelle Erhebungen bietet. Den „energetischen Sanierungs- und Neubaubedarf von Gebäuden der kommunalen und sozialen Infrastruktur“ haben von Hebel et al. (2011) untersucht. In Einzelbereichen werden im Rahmen der Arbeit aktuelle Zahlen recherchiert. Einen Überblick über die Gewichtung und Verteilung der grauen Emissionen im Bestand des Bauwesens bieten Weidner et al. (2021b) mit Auskünften zu besonders schwerwiegenden Kriterien und zugeordneten Optimierungsstrategien. Die DGNB hat ihre eigenen Grenzwerte mit einer Studie hinterfragt und die CO₂-Emissionen von 50 zertifizierten Gebäuden überprüft. Durchschnittliche Emissionen von 8,7 kg CO₂-Äq./m²*a wurden dabei festgestellt, was unter dem Referenzwert der Zertifizierung von 9,4 kg CO₂-

Äq./m²*a lag (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., 2021, S. 12). Damit wurde bewiesen, dass eine Bauausführung nach geforderten Kriterien bei Einhaltung gültiger technischer Regeln realisierbar ist.

Für die Arbeit werden die Vorgaben des QNG- und DGNB-Systems mit einer Lebensdauerbemessung von 50 Jahren für alle Gebäude anerkannt. Diese verweisen auf Nutzungsdauern für Lebenszyklusanalysen (LCA) von Bauteilen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2021b, S. 75) nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), die vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2017) bereitgestellt werden, um in der LCA für alle Bauteile mit einer Lebensdauer unter 50 Jahren in Instandhaltung oder Austausch (Lützkendorf et al., 2009, S. 16) angewandt zu werden.

2.3 Definition des Maßnahmenumfangs

Um eine Vergleichbarkeit der Sanierungsmaßnahmen zu schaffen, muss ein Mindeststandard für bauliche Vorhaben definiert werden (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023, S. 4). Eine Option ist die Koppelung an Effizienzhaus-Stufen, welche von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) bereitgestellt werden. Die Effizienzhaus-Kategorien setzen sich aus zwei Faktoren zusammen. Es wird der Primärenergiebedarf, der den Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes beschreibt und der Transmissionswärmeverlust bewertet, der als Kriterium für die Qualität der Dämmeigenschaften einer Gebäudehülle steht. Demnach sind beispielsweise Förderungen und Kredite an die Auszeichnung als „klimafreundliches Wohngebäude“ gekoppelt. Eine weitere Voraussetzung ist die Beauftragung eines Experten für Energieeffizienz. Für eine Förderung der QNG wird darüber hinaus eine Beratung für Nachhaltigkeit gefordert (Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), 2024).

Das Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen (2023, S. 4) definiert in den LCA-Bilanzregeln den Umfang einer Komplettmodernisierung als „bauliche Maßnahmen an der Gesamtheit eines selbstständigen Baukörpers, der dem Altbestand zuzuordnen ist“, dabei sollen weitestgehend die Anforderungen eines Neubaus erreicht werden und ein Rückbau auf die „statisch relevante Baukonstruktion erfolgen.“ Kleinere Modernisierungsmaßnahmen sollten innerhalb des Lebenszyklus als Instandhaltungen abgebildet werden. Die hier als „Sanierung“ bezeichnete Maßnahme beschreibt demnach einen umfassenden Eingriff, der ein Gebäude am Ende seines Lebenszyklus in den

Standardzustand eines aktuellen Neubaus versetzt und damit für einen neuen Lebenszyklus nutzbar macht. Getrennt davon sind wiederkehrende Instandhaltungsmaßnahmen (Phase B2) zu betrachten. Diese sind beispielsweise ein Fassadenanstrich, der Austausch (Phase B5) des Bodenbelags oder die Erneuerung der Fenster. In der LCA wird in Jahren ein „service life“ angegeben, wodurch innerhalb des Betrachtungsrahmens der Austausch bzw. die Erneuerung eingerechnet wird. Die anfallenden Emissionen werden hier veranschlagt, jedoch fehlt die Prognose über zukünftige Emissionen der Instandhaltung (Phase B2), Instandsetzung (Phase B3), Austausch (Phase B4) und Modernisierung (Phase B5) im Sinne der reduzierten CO₂-Emissionen der Zukunft. Die Bewertung dieser Maßnahmen wird durch die Anwendung einer LCA an einem Beispielprojekt belegt.

2.4 Methode Lebenszyklusanalyse der QNG

Häufig werden Förderprogramme genutzt, um die Einführung von Gesetzen vorab zu testen. Das Qualitätssiegel nachhaltiges Gebäude (QNG) und der „Klimafreundliche Neubau“ (KN) fordern nach definierten Vorgaben die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse als Teil der Zertifizierung (Lützkendorf, 2023). Der Primärenergieaufwand und das Treibhausgaspotential werden über einen 50-jährigen Zeitraum in Bezug zur Netto-Raumfläche (DIN 277 (2021-08)) gesetzt und zur Bewertung herangezogen. Zusätzlich ist eine Angabe der Brutto-Grundfläche als Bezugsfläche gefordert. Vorgaben zur Bereitstellung der Ergebnisse sind in Anlage 4 zum Handbuch des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude definiert. Das QNG fordert für Wohngebäude die Einhaltung folgender Aspekte (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen Pressereferat, 2024): Über den Gebäudelebenszyklus dürfen für die QNG-Plus-Zertifizierung THG-Emissionen von 24 kg CO₂-Äq./m²*a nicht überschritten werden, während der Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Quellen von maximal 96 kWh/m²*a eingehalten wird. Für die anspruchsvollere Auszeichnung „QNG-Premium“ betragen die Grenzwerte 20 kg CO₂-Äq./m²*a Emissionen und 64 kWh/m²*a an nicht-erneuerbarem Primärenergiebedarf. Für Nichtwohngebäude werden separate projektspezifische Benchmarks ermittelt, um die besonderen Anforderungen an verschiedenen Gebäudenutzungen abzubilden. Es werden getrennte Grenzwerte für gebäude- und nutzungsbedingte Emissionen ermittelt und an Neubau und Sanierung gleiche Anforderungen gestellt. Die bei Sanierungsobjekten oft höheren Nutzungsemissionen sollen sich dabei durch bereits enthaltene graue Emissionen in der vorhandenen Bausubstanz ausgleichen. Die Grenzwerte wurden für das QNG-Zertifikat wie bei vergleichbaren Zertifizierungssystemen in

einem Bottom-Up-Prinzip entwickelt. Ausschlaggebend sind dabei Bestandsgebäude und aktuelle Trends in der Bauausführung, die vergleichbare Ergebnisse erzielen. Es wird Bezug auf Referenzgebäude genommen und die Optimierung gegenüber einer berechneten Alternative bewertet. Das Förderprogramm „Klimafreundlicher Neubau“ (KN) wird aktuell an das QNG-Zertifikat als Grundvoraussetzung gebunden (Lützkendorf, 2023).

Bewertungsrelevante Bilanzgröße	Bezugsgröße	Einheit
Primärenergieaufwand, nicht erneuerbar (Q _{P,ne}) ⁴	NRF (R)	kWh PE _{ne} / m ² _{NRF (R)} * a
Treibhauspotenzial (GWP ₁₀₀)	NRF (R)	kg CO ₂ Äqui. / m ² _{NRF (R)} * a

Abbildung 4 Bewertungsrelevante Bilanzgrößen der Ökobilanz (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Die Ökobilanzierung ist nach DIN EN 15643: 2021 in Verbindung mit DIN EN 15978-1 durchzuführen. Die in der Tabelle hervorgehobenen Lebenszyklusphasen gehen in die Berechnung ein. Zusätzlich wird für die QNG-Nachweisführung gefordert, dass folgende Werte separat angegeben werden. Sie fließen aber nicht in die Erfüllung der Anforderungen ein.

- Recyclingpotenzial (Modul D15) in [kWh PE_{ne} / a] und [kg CO₂-Äq. / a]
- bei Dritten potenziell vermiedene Treibhausgasemissionen infolge gelieferter Energie (Modul D2) in [kg CO₂-Äq. / a]

Lebenszyklusphasen	Herstellung			Errichtung			Betrieb und Nutzung							Rückbau, Abfallbehandlung und Entsorgung		Vorteile & Belastungen außerhalb Systemgrenze		
Modulgruppen	A 1-3			A 4-5			B 1-7							C 1-4		D		
	Rohstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport	Errichtung / Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Instandsetzung/Reparaturen	Austausch	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Entsorgung	Recyclingpotenzial	Effekte exportierter Energie
Module	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1	D2

Abbildung 5 Darstellung der Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15643: 2021-12 (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

In Abweichung zum GEG werden in der betriebs- und nutzungsbezogenen Phase erneuerbare Energien gebäude- und standortspezifisch berücksichtigt (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023, S. 6).

$$\text{bezBG}_{\text{ges},50,i} = \frac{\text{BG}_{\text{ges},50,i}}{A} \quad (\text{Formel 1})$$

$$\text{BG}_{\text{ges},50,i} = \text{BG}_{\text{H},50,i} + \text{BG}_{\text{E},50,i} + \text{BG}_{\text{N},50,i} + \text{BG}_{\text{R},50,i} \quad (\text{Formel 2})$$

bez	bezogene Bilanzgröße unter Einbeziehung der Bezugsgröße A
A	Bezugsfläche NGF (R) und informativ BGF(R) gemäß DIN 277 (2021-08)
$\text{BG}_{\text{ges},50,i}$	Bilanzgröße i im Betrachtungszeitraum (50a) mit i für GWP_{100} oder $\text{Q}_{\text{P,ne}}$
$\text{BG}_{\text{H},50,i}$	Bilanzgröße i infolge der Herstellung definierter Bauprodukte, Bauteile und Anlagen (Modul A1-A3 für Neubau und Komplettmodernisierung)
$\text{BG}_{\text{E},50,i}$	Bilanzgröße i infolge definierter Ersatzmaßnahmen im Betrachtungszeitraum (Modul B4)
$\text{BG}_{\text{N},50,i}$	Bilanzgröße i infolge des Betriebs und der Nutzung des Gebäudes im Betrachtungszeitraum (Modul B6.1 und B6.3)
$\text{BG}_{\text{R},50,i}$	Bilanzgröße i bei infolge Abfallbehandlung / Entsorgung (Recycling) definierter Baumaterialien, Bauteile und Anlagen des Altbestands bzw. Neubaus (Modul C3-C4)

Abbildung 6 Formel 1 und 2 zur Berechnung der LCA (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Der Anteil für die Herstellung (Modul A1-A3) wird im Verhältnis zum Betrachtungszeitraum ermittelt.

$$\text{BG}_{\text{H},50,i} = \frac{\sum_j \text{BG}_{\text{H},50,i,j}}{\Delta t} \quad (\text{Formel 3})$$

\sum_j	Bilanzgröße i infolge der Herstellung aller gemäß der Systemgrenzen zu erfassender Baumaterialien, Bauteile und Anlagen
Δt	Betrachtungszeitraum (Vorgabe: $\Delta t = 50$ a)

Abbildung 7 Formel 3 zur Summierung der erfassten Bilanzdaten (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Für geplante Ersatzmaßnahmen (Modul B4) werden Werte für den Ausbau (Abfallbehandlung / Entsorgung Modul C3-C4) und den Einbau (Herstellung Modul A1-A3) summiert. Es sind die

erwarteten Lebensdauern einzelner Bauteile, Anlagen, Schichten und Komponenten zu berücksichtigen und gegebenenfalls ein mehrfacher Austausch innerhalb des Bilanzierungsrahmens bis einschließlich des 49. Jahres anzusetzen. Die Werte für Austauschzyklen und Ersatzmaßnahmen sind den „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ mit Stand 24.02.2017 zu entnehmen. Für die Technische Gebäudeausstattung (TGA) sind Werte in den Tabellen 8 bis 11 der Bilanzierungsregeln hinterlegt.

$$BG_{E,50,i} = \frac{\sum_m n_{E,50,m} \times BG_{E,50,i,m}}{\Delta t} \quad (\text{Formel 4})$$

$\sum_m n_{E,50,m} \times BG_{E,50,i,m}$	Bilanzgröße i für Ersatzmaßnahmen / Austausch, welche sich als Summe über alle m gemäß Systemgrenzen zu bilanzierende Bauwerksteile, Bauteile und Anlagen des Gebäudes im Zusammenhang mit Ersatzmaßnahmen ergibt.
Δt	Betrachtungszeitraum (Vorgabe: $\Delta t = 50$ a)
$n_{E,50,m}$	ganzzahlige Anzahl der Ersatzmaßnahmen im Betrachtungszeitraum

$$BG_{N(B6.1+B6.3),50,i} = \sum_k BG_{N,i,k} \quad (\text{Formel 5})$$

$\sum_k BG_{N,i,k}$	Bilanzgröße infolge des gebäudebedingten jährlichen Endenergiebedarfs durch dessen Betrieb in der Nutzungsphase (Modul B6.1) zuzüglich einer Pauschale für den Energiebedarf der Nutzer (Modul B6.3) als Summe über alle eingesetzten Endenergieträger (k)
---------------------	--

Abbildung 8 Formel 4 und 5 betreffen den Austausch und den jährlichen Endenergiebedarf (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Die Energie für den Betrieb und die Nutzung (Modul B6.1 und B6.3) wird nach den Vorgaben des GEG berechnet. Es wird eine Pauschale für den nutzungsbedingten Energieaufwand addiert, diese beträgt im Wohngebäude 20 kWh/m² beheizte NRF und Jahr. Der Energiebedarf von Aufzügen (Modul B6.2) wird in der Bilanzierung nicht inkludiert.

$$BG_{N,i,k} = f_{ökö,i,k} \times Q_{E,k} \quad (\text{Formel 6})$$

$Q_{E,k}$	Endenergiebedarf, dargestellt als Bedarf an Endenergieträgern
$f_{ökö,i,k}$	Spezifischer Primärenergie- oder Emissionsfaktor i des Endenergieträgers k (gemäß der Tabelle <i>Ökobilanzierung – Rechenwerte 2023</i>)

Abbildung 9 Formel 6 Ermittlung der Emissionen je Energieträger (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Abweichend ist die Vernachlässigung des selbsterzeugten und -genutzten Solarstroms, welcher mit dem Primärenergie- und Emissionsfaktor 0 versehen wird. An Dritte veräußertes Strom aus einer PV-Anlage wird mit 550 g CO₂-Äq./kWh potenziell vermiedener THG-Emissionen verrechnet. (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023, S. 8) Graue Energie und Emissionen der Anlage selbst werden anteilig der exportierten Energie zugeordnet und somit nicht Teil der Gebäudebilanzierung. In Modul D2 können potenziell vermiedene THG-Emissionen geltend gemacht werden (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023, S. 11).

Für die Abfallbehandlung und Entsorgung (Modul C3-C4) wird folgende Bilanzrechnung angesetzt.

$$BG_{R,50,i} = \frac{\sum_j BG_{R,50,i,j}}{\Delta t} \quad (\text{Formel 7})$$

$\sum_j BG_{R,50,i,j}$ Bilanzgröße i infolge Abfallbehandlung / Entsorgung (Modul C3-C4), welche sich als Summe über alle j zu bilanzierende Bauwerksteile, Bauteile und Anlagen des Gebäudes ergibt.

Abbildung 10 Formel 7 Ermittlung der Emissionen von Abfallbehandlung und Entsorgung (Modul C3-C4) (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Systemgrenzen der QNG-Bilanzierungsregeln

Für die Bilanzierung sind bestimmte Bauwerks- und Bauteile der Kostengruppe (KG) 300, der DIN 276 sowie ausgewählte gebäudetechnische Anlagen der KG 400 und für den Betrieb erforderliche Bauteile der KG 500 relevant. Diese sind in Abschnitt 6 des Anhangs 3.1.1 zur ANLAGE 3 Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude aufgeführt. Die konkreten Vorgaben erlauben eine Vergleichbarkeit verschiedener Gebäude, welche nach einheitlichen Grenzen bilanziert werden.

2.5 Rechtliche Grundlagen

Obwohl bereits die Gebäudezertifizierungssysteme wie BNB, DGNB, NaWoh und BNK den Indikator „Treibhausgaspotential“ mit der Summe an CO₂-Äq. Emissionen beschreiben, schreibt das Ordnungsrecht noch keine Begrenzung dieser, neben dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf, vor (Lützkendorf, 2023). Andere Länder sind bereits einen Schritt weitergegangen und haben einen Maximalwert für THG-Emissionen rechtlich gefordert. So verlangt beispielsweise Norwegen als erstes Land bereits im Bauantrag den Nachweis über die Einhaltung der Grenzwerte in einer LCA, was über stetig verschärfte Werte in einem Stufenplan dazu führt, dass sich Architekten wie Buro Happold (2022) gezwungen sehen, in dynamischen Modellen eine Berechnung der Umweltwirkungen zu integrieren, um Entscheidungen frühzeitig zu validieren. Daraus ergeben sich bereits im Entwurfsprozess deutliche Tendenzen zu nachhaltigeren Bauweisen und Materialien.

2.5.1 Klimaschutzabkommen von Paris

Von über 180 Staaten wurde das im Dezember 2015 in Paris verabschiedete Klimaschutzabkommen ratifiziert und verfolgt drei Ziele (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2018):

- Die Staaten setzen sich das globale Ziel, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf "deutlich unter" zwei Grad Celsius zu begrenzen mit Anstrengungen für eine Beschränkung auf 1,5 Grad Celsius.
- Die Fähigkeit zur Anpassung an den Klimawandel soll gestärkt werden und wird neben der Minderung der Treibhausgasemissionen als gleichberechtigtes Ziel etabliert.
- Zudem sollen die Finanzmittelflüsse mit den Klimazielen in Einklang gebracht werden.

Die einzelnen Staaten legen dabei ihre jeweiligen Maßnahmen selbst fest. Zur Überprüfung der Zielerreichung wird alle 5 Jahre nach gemeinsamen Vorgaben der aktuelle Stand berichtet. Während in einigen Ländern die Treibhausgasemissionen weiter ansteigen, hat die deutsche Industrie ihre Emissionen in den vergangenen Jahrzehnten bereits senken können, wofür

teilweise große Investitionen getätigt wurden. Für die Orientierung der Industrie soll das Klimaschutzgesetz die Ziele des Pariser Klimaabkommens in nationalem Recht konkretisieren.

2.5.2 European Green Deal und EU-Gebäuderichtlinie

Die EU hat sich mit dem „Fit-for-55-Paket“ darauf verständigt, die THG-Emissionen bis 2030 um 55% zu reduzieren, um das Pariser Klimaabkommen zu erfüllen (Rat der Europäischen Union und Europäischer Rat, 2024). Sie steigert stetig ihre Ambitionen, die Emissionen zu senken und entwickelt aus den Klimazielen rechtliche Verpflichtungen. Auch Grundlagen für einen Emissionshandel werden gelegt, um eine Verschiebung der Emissionen in andere geographische Bezugsgebiete oder Sektoren zu vermeiden. Eine Treibhausgasneutralität will Europa bis 2050 erreichen (Rat der Europäischen Union und Europäischer Rat, 2024). Sowohl die Umsetzung als auch eine Definition konkreter Maßnahmen obliegen weiterhin den einzelnen Staaten. Ab 2030 gilt für den Neubau, dass alle Gebäude emissionsfrei sein sollen, jedoch ist es den Mitgliedsstaaten freigestellt, ob sie die gesamten Lebenszyklusphasen bei der Berechnung betrachten (Europäisches Parlament, 2024). Bereits zwei Jahre zuvor gilt dieser Standard für behördlich betriebene Gebäude. Schrittweise sind Wohn- und Nichtwohngebäude zu sanieren, konkret wird die Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2030 nach dem Rat der Europäischen Union und Europäischer Rat (2024) um 16 %, bis 2035 um 22 % in Wohngebäuden vorgeschrieben. Bis 2040 sollen alle mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizkessel ersetzt werden. Die Richtlinie fordert, dass bis 2030 16 % und bis 2033 26 % der Nichtwohngebäude mit schlechter Gesamtenergieeffizienz zu sanieren sind und sofern technisch und wirtschaftlich möglich, alle öffentlichen und Nichtwohngebäude mit Solaranlagen ausgestattet werden. Es soll besonders unter den schlechtesten Gebäuden die Sanierungsrate erhöht werden, während Luftqualität, Digitalisierung und der Ausbau nachhaltiger Mobilität verbessert werden (Rat der Europäischen Union und Europäischer Rat, 2024).

Mit der 2024 beschlossenen Überarbeitung der EU-Gebäuderichtlinie (EPBD) werden weitere Schritte definiert und die EU-Staaten verpflichtet, sie innerhalb von zwei Jahren in nationales Recht zu überführen. Als Teil des Green Deal soll die Richtlinie zusammen mit folgenden Auflagen für eine Zielerreichung sorgen (European Commission - Directorate-General for Energy, 2024):

- emissions trading system for fuels used in buildings
- revised Energy Efficiency Directive (EU/2023/1791)
- revised Renewable Energy Directive (EU/2023/2413)

- Alternative Fuels Infrastructure Regulation

Die Fristen zur Erreichung von Sanierungsstandards und des klimafreundlichen Neubaus ab 2030 sind damit festgelegt, während Öl- und Gasheizungen ab 2025 nicht mehr gefördert werden. Bei technischer Realisierbarkeit und wirtschaftlicher Sinnhaftigkeit sollen ab 2030 Solaranlagen auf Wohngebäuden verpflichtend vorgesehen werden. Es ist den Staaten überlassen, mit welchen Maßnahmen sie die Ziele umsetzen oder in welchem Umfang gegebenenfalls Sanktionen bei Nichterfüllung erlassen werden. Auf eine konkrete Vorgabe zu Sanierungspflichten wird in der Richtlinie verzichtet (European Commission - Directorate-General for Energy, 2024).

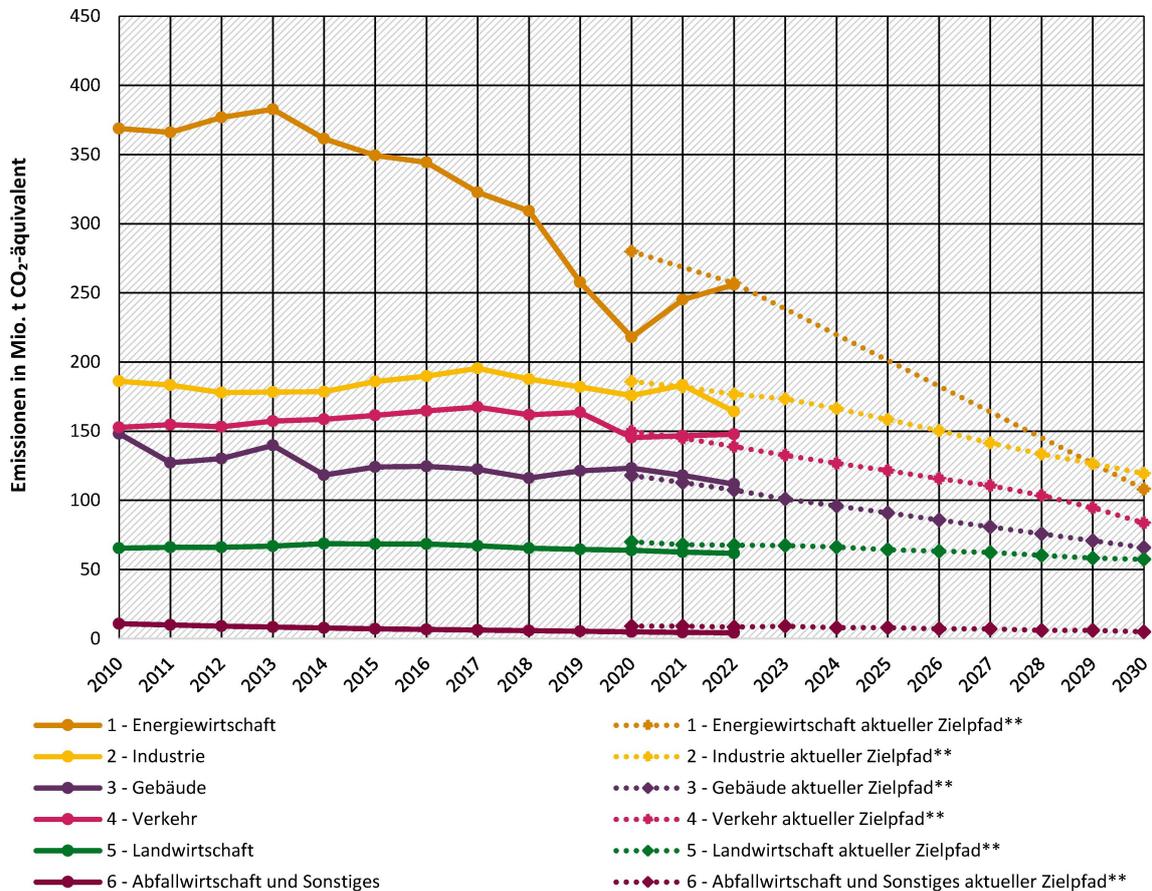
2.5.3 Deutschland und das Klimaschutzgesetz

Die Bundesregierung (2019) hat durch Verschärfungen der Emissionsgrenzen im Klimaschutzgesetz (KSG) klare Vorgaben zur Reduktion der CO₂-Emissionen festgelegt. Es ist das weltweit erste Klimaschutzgesetz dieser Art und verpflichtet zur jährlichen Kontrolle. So wird bis 2030 eine Reduktion der innerdeutschen CO₂-Emissionen um 65 % angestrebt und es wurden für die jeweiligen KSG-Sektoren Zwischenziele aufgestellt. Im Jahr 2040 soll eine Reduktion um 88 % realisiert werden und bis 2045 eine Netto-Treibhausgasneutralität in Deutschland erreicht werden. Das bedeutet, dass ab diesem Zeitpunkt die Menge an Emissionen nicht mehr größer sein darf als natürliche Senken binden. Nach 2050 wird dann eine weitere Reduktion angestrebt, um mehr Treibhausgase aufzunehmen, was aber nicht in konkreten Werten definiert ist. Eine transparente Ableitung der Ziele und Budgets aus dem Klimaschutzgesetz in Bezug auf die Pariser Klimaziele wurde bislang nicht veröffentlicht und es bleibt eine Lücke in der Nachvollziehbarkeit bestehen (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2024, S. 1).

Wenn in Zukunft die Bereitstellung erneuerbarer Energie weiter voranschreitet und flächendeckend ökonomisch realisierbar wird, verbessern sich damit die Emissionen in der Bereitstellung von Baustoffen. Diese Entwicklung ist in den KSG-Sektoren Energiewirtschaft und Industrie verankert. Besonders der Zielpfad für die Energiewirtschaft fordert eine deutliche Verbesserung bezüglich seiner Emissionswerte gegenüber den anderen Sektoren. Ausgehend vom Jahr 2020 sollen die CO₂-äq. Emissionen innerhalb von 10 Jahren dabei mehr als halbiert (Pfad orange) und im Industrie- und Gebäudesektor (gelb und violett) etwa um 30 % reduziert werden.

Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland

in der Abgrenzung der Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG)



* Die Aufteilung der Emissionen weicht von der UN-Berichterstattung ab, die Gesamtemissionen sind identisch
 ** entsprechend der Novelle des Bundes-KSG vom 12.05.2021, Jahre 2022-2030 angepasst an Über- & Unterschreitungen

Quelle: Umweltbundesamt 13.03.2023

Abbildung 11 Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland (Umweltbundesamt, 2023d)

Um die Ziele zu erreichen, sollen außerdem natürliche Senken weiter gestärkt werden, um die nur erschwert durchführbare Reduktion der Emissionen auszugleichen (Bundesregierung, 2019). Negativemissionen durch technische Unterstützung reichen von realisierbaren Anlagen bis zu Eingriffen in das Erdsystem, die von Thiele et al. (2022) aus aktueller Sicht als abwegig eingestuft werden und demnach in Gesamtbilanzen kaum Berücksichtigung finden.

Durch eine Überarbeitung des Klimaschutzgesetzes beschließt der Deutsche Bundestag (Deutscher Bundestag, 2024), dass die ursprünglichen sektorenbundenen Ziele aufgehoben und zu Gesamtzielen vereint werden. Am 26. April wurde die Neuerung verabschiedet, die in einer nachträglichen Änderung auch natürlichen Senken eine besondere

Bedeutung zuspricht und einen Nachsteuermechanismus bis im Jahr 2029 erlaubt, um Doppelungen zu vermeiden. Aus den Änderungen des KSG ergibt sich ein weiterer Spielraum. Beispielsweise ist der Verkehrssektor, der drei Jahre in Folge die gesetzten Ziele nicht einhalten konnte, nicht mehr zu direkten Handlungskonsequenzen verpflichtet. Eine Verlagerung der Emissionen zwischen den einzelnen Sektoren wird ermöglicht. Wie in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU vorgesehen, ist darüber hinaus ein beschleunigtes Genehmigungsverfahren für Energie-Infrastrukturprojekte geplant, um zeitnah eine emissionsneutrale Energieversorgung zu gewährleisten (Deutscher Bundestag, 2024).

Bei Untersuchung des Endenergieverbrauchs in Deutschland lässt sich eine Tendenz zu mehr erneuerbaren Energieträgern und einer Reduktion der Mineralölprodukte feststellen. Im Jahr 2022 besteht der Verbrauch der deutschen Haushalte nach Veröffentlichungen im Umweltbundesamt (2023a) jedoch weiterhin zu 124 TWh aus Mineralölprodukten und 249 TWh aus Gasen, wovon insbesondere Erdgas als nicht erneuerbarer Energieträger zur Last der Treibhausgase fällt. Gegenüber dem Verkehrssektor, der mit 648 TWh aus Mineralölprodukten negativ heraussticht und der Industrie, die im Gegensatz zu den anderen Sektoren noch 109 TWh aus Stein- und Braunkohle gewinnt, zeichnet sich der Energiemix der Baubranche bereits durch einen hohen Nutzungsanteil an erneuerbarer Energie aus.

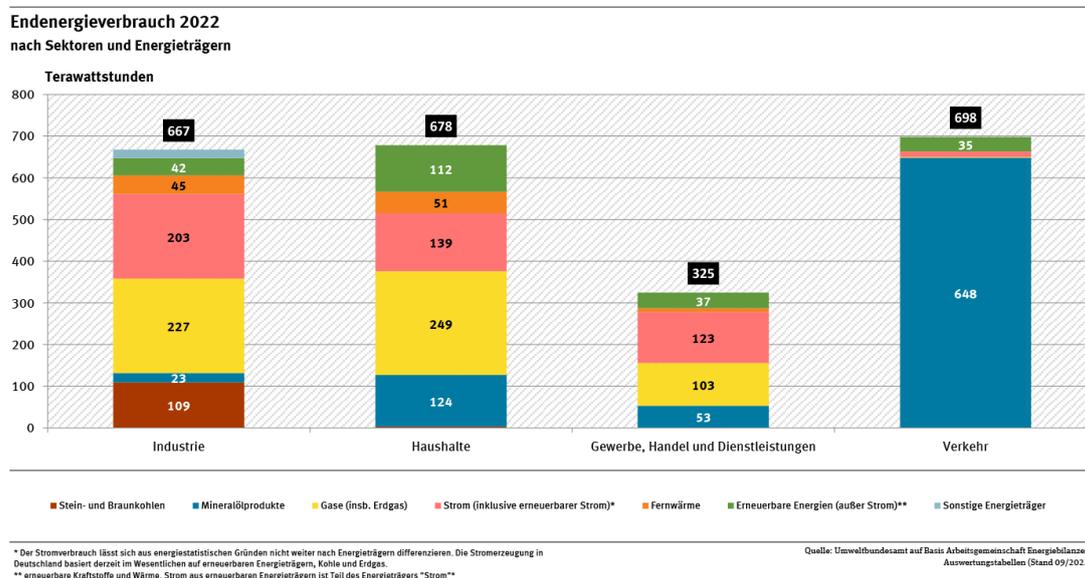


Abbildung 12 Endenergieverbrauch Deutschland 2022 (Umweltbundesamt, 2023a)

2.5.4 CO₂-Preis

Eine weitere Maßnahme zur Senkung der CO₂-Emissionen ist die Besteuerung von CO₂. Die Bundesregierung (2024) hat den Preis für eine Tonne CO₂ zum 01.01.2024 auf 45,00 € angehoben und plant eine weitere Erhöhung um 10,00 € für das Jahr 2025 und die Einführung eines einheitlichen europäischen Emissionshandelssystems bis 2027. Seit 2021 wird von Firmen, die mit fossilen Brennstoffen handeln, eine CO₂-Steuer erhoben, die im Jahr 2026 auf 55,00€ und 65,00€ pro t CO₂ erhöht werden soll. Im Ausgleich zu Klimaschutzmaßnahmen wurde über die Erneuerbare-Energien-Gesetz(EEG)-Umlage ein finanzieller Ausgleich geschaffen und Wohngeld bezuschusst (Bundesregierung, 2022). Bereits seit 2022 werden in Deutschland alle fossilen CO₂-Brennstoffemissionen besteuert und über das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEGH) der Handel von Zertifikaten für Emissionsrechte geregelt. Die Einnahmen werden direkt in Klima- und Transformationsfonds investiert, um den Klimaschutz in Deutschland zu stärken und die Kosten der EEG-Umlage zu finanzieren (Bundesregierung, 2024). Die Klimakosten von Umweltbelastungen liegen jedoch deutlich über der Besteuerung. Das Umweltbundesamt (2023c) ermittelte den Kostensatz von 809 € pro Tonne CO₂ für das Jahr 2022 bei Gleichgewichtung der Wohlfahrt von Generationen und 0% reiner Zeitpräferenzrate für Kosten von „umweltbedingten Gesundheits- und Materialschäden, Ernteauffällen oder Schäden an Ökosystemen.“

2.6 Globale Nachhaltigkeitsziele

Die von der Weltgemeinschaft verabschiedete Agenda 2030 beinhaltet 17 zentrale Nachhaltigkeitsziele (SDGs), welche sich an „die Regierungen weltweit, aber auch die Zivilgesellschaft, die Privatwirtschaft und die Wissenschaft“ richten (Bundesregierung, 2023). Anhand dieser Ziele lässt sich die Gefährdung der Menschheit und deren Chancengleichheit in Relation zu Konsequenzen aus der Klimaerwärmung setzen. Das IPCC erwartet, dass durch fortschreitende CO₂-Emissionen einige Zielsetzungen negativ beeinflusst werden. Eine Reduktion von vorzeitigen Todesfällen in der Größenordnung von 110 bis 190 Mio. Leben wird allein zwischen dem 1,5 °C und dem 2 °C-Szenario durch Luftverschmutzung erwartet (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018, S. 464). Ein weiteres Risiko stellt die Nahrungsmittelknappheit dar. Mit steigenden Temperaturen fallen Ernten geringer aus und es kommt in einigen Regionen weltweit zu einer gesteigerten Knappheit der Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln. Außerdem führt eine Klimaerwärmung zu weniger verfügbarem Frischwasser. Der Grundwasserspiegel sinkt und die Vermehrung von Bakterien wird durch

erhöhte Temperaturen angeregt, was zu kürzeren Haltbarkeitszeiten von Wasser und Nahrungsmitteln führt. Auch gibt es negative Korrelationen zwischen bereits vorangebrachten Maßnahmen für den Klimaschutz gegenüber der Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele. Beispielsweise kann die Erhebung von hohen Steuern auf fossile Brennstoffe dazu führen, dass Menschen in armen Ländern ohne ausgebaute Energieversorgung kaum Zugang zu Brennstoffen für das Kochen ihrer Speisen erlangen. Die Auswirkungen werden in verschiedenen Klimamodellen gegenübergestellt. In einzelnen Bereichen führt eine Erwärmung um 1,5 °C zu weniger schwerwiegenden Folgen als eine Erwärmung um 2 °C (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 2023). Generell lässt sich aber feststellen, dass die negativen Folgen einer starken Klimaerwärmung überwiegen. Aus Synergien entlang des 1,5 °C-Pfades werden einfachere Erreichbarkeiten der Nachhaltigkeitsziele vorhergesagt.



Abbildung 13 Die 17 Nachhaltigkeitsziele der Agenda 2030 (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 2023)

Insbesondere das SDG-Ziel 13: Maßnahmen zum Klimaschutz erfordert eine schnelle Reduktion der Emissionen und beinhaltet auch Zwischenziele und Parallelmaßnahmen. Beispielsweise sollen Vorbereitungen für Folgen der Klimaerwärmung frühzeitig getroffen werden, um eventuellen Konsequenzen mit Resilienz zu begegnen.

2.7 Kipppunkte

Einige Bewertungssysteme bilanzieren die Emissionen unter der Annahme, dass in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts CO₂-Einsparungen in Senken die zuvor erhöhten Emissionen ausgleichen werden. Sie liefern teilweise plausible Ansätze und sind wissenschaftlich akzeptiert (vgl. Kapitel Deutschland und das Klimaschutzgesetz), jedoch kommt es bei Überschreitung einzelner Grenzen zu irreversiblen Konsequenzen, die auch durch CO₂-Rückgewinnung nur gering eingedämmt werden. Diese Kipppunkte zeigen sich im Verlust von Ökosystemen, Wetterextremen und einem steigenden Meeresspiegel. Daraus resultieren Hunger durch Ernteausfälle, eine verstärkte Ausbreitung von Krankheiten und möglicherweise politische Konflikte, wie sie nach den Vorgaben der UN-Nachhaltigkeitsziele zu vermeiden sind (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 2023). Exakte Schwellenwerte für die jeweiligen Bedrohungen sind wegen einer Vielzahl komplexer Vernetzungen nicht prognostizierbar. Die Abbildung 14 zeigt, dass einige Kipppunkte bereits im Bereich der Klimaziele des Pariser Abkommens liegen. Die Schwellenwerte befinden sich jeweils zwischen der gelben (niedrige Wahrscheinlichkeit) und roten (hohe Wahrscheinlichkeit) Markierung in der Grafik. Durch Rückkoppelungen können die Effekte sich gegenseitig weiter verstärken und berechnete Budgets reduzieren. Sie verdeutlichen die Dringlichkeit eines Einhaltens der Pariser Klimaziele, um unkalkulierbare Folgen einzuschränken. Die Antworten auf die Frage, ob bei Überschreitung der einzelnen Faktoren eine Stabilisierung der Temperaturen unter 2 °C-Erwärmung überhaupt möglich ist, unterscheiden sich in verschiedenen Modellen. Veröffentlichte Budgets sollten demnach als Maximalwerte betrachtet werden und sofern möglich mit Fortschreiten der Wissenschaft und neuen Erkenntnissen weiter reduziert werden. Einige Kipppunkte werden folgend beschrieben, jedoch wird keine belastbare Aussage zu konkreten Maximalwerten getroffen, wie es das Top-Down-Verfahren benötigen würde.

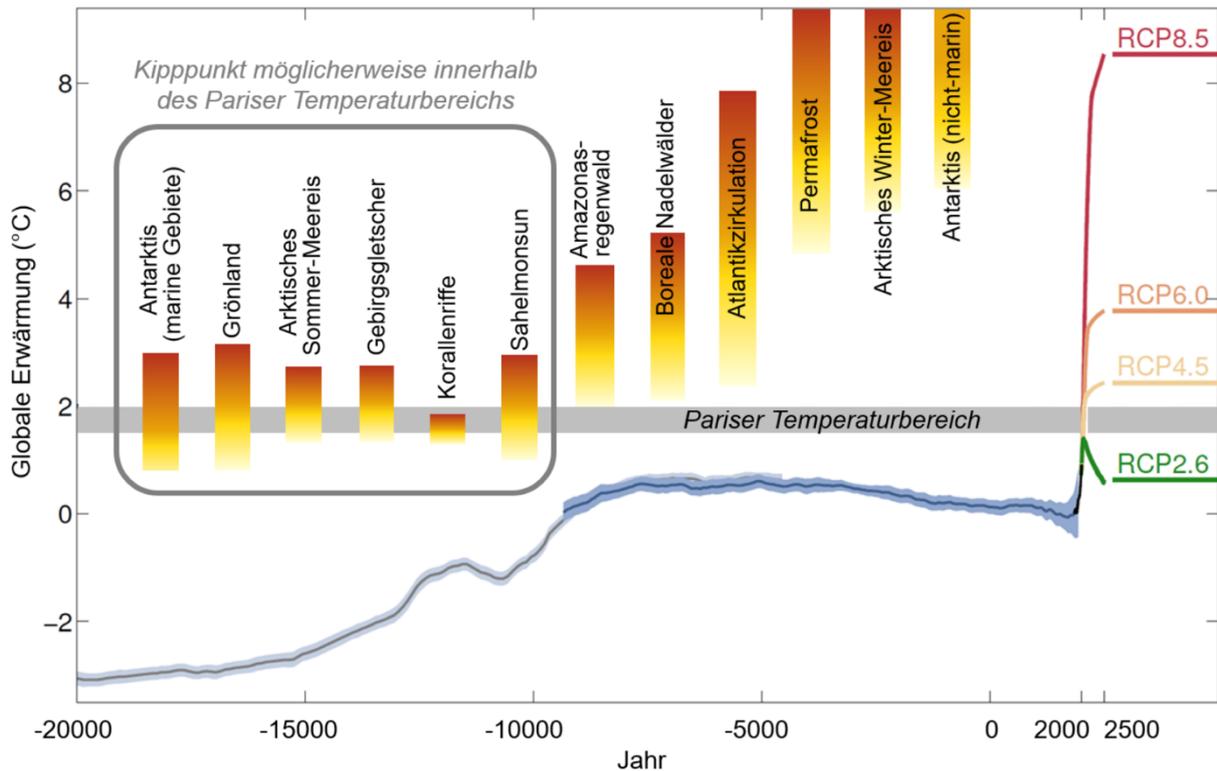


Abbildung 14 Unsicherheitsbereiche der wichtigsten Kippelemente im Kontext der globalen Temperaturentwicklung seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit und für die Zukunft (verschiedene Emissionsszenarien; RCP2.6 wäre Paris-kompatibel, RCP 8.5 ist der Pfad ohne wirksame Klimapolitik). (Prof Levermann et al., 2019)

2.7.1 Meereis

Das arktische Eis reflektiert mit seiner geschlossenen Eisdecke auftreffende Sonnenstrahlung und verhindert damit eine potenzielle Erwärmung des Klimas. Je weniger Eis vorhanden ist, desto mehr Strahlung wird absorbiert, was zu erhöhten Temperaturen beiträgt. Als Bestandteil des arktischen Ökosystems wird die Eisdecke nach dem Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2018, S. 257) bei 2 °C Erwärmung bereits jeden 10. Sommer vollständig abschmelzen und bei weiteren Erwärmungen auch im Winter gefährdet sein. Als Kippunkte bezeichnete Rückkoppelungen führen bei Überschreitung bestimmter Budgets zum verstärkten Eintreten weiterer kritischer Kippunkte und zu einer gesteigerten Erwärmung der Erdatmosphäre.

2.7.2 Meeresspiegel

Wenn weiteres Eis in Grönland und der Antarktis schmilzt, wird ein Anstieg des Meeresspiegels um 65 m (Prof Levermann et al., 2019) erwartet, was wiederum weite Lebensräume zerstört und fruchtbares Land verdrängt. Für eine Umkehr des Verhältnisses von Schmelzen zu Schneefall werden die Antarktis und Grönland mit einer Erwärmung von 3-4 °C eingestuft. Damit würde der Eisschild an Masse verlieren, bis kein Eis mehr vorhanden ist. Andere Modelle und Auswertungen von Satellitenaufnahmen erwarten diese Auswirkung aufgrund von Eisbewegung schon bei 1-2 °C globaler Erwärmung (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018, S. 7). Das Schmelzen wird weiter beschleunigt, wenn die Eisoberfläche weiter in tiefere und damit zunehmend wärmere Luft gerät.

2.7.3 Korallenriffe

Von Temperaturerhöhungen sind besonders Korallenriffe stark betroffen. Der 1,5-Grad-Bericht der Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2018, S. 38) rechnet mit einem vollständigen Verlust der tropischen Korallenriffe bei einem Temperaturanstieg von 2 °C. Die Korallenbleiche breitet sich aus, da Korallenriffe bei länger anhaltenden, erhöhten Wassertemperaturen sich nicht mehr regenerieren können. Bei weiteren Verlusten der Korallenriffe könnten weltweit etwa eine halbe Milliarde Menschen bezüglich ihres Einkommens, der Nahrungsversorgung oder des Küstenschutzes gefährdet werden (Prof Levermann et al., 2019, S. 4).

2.7.4 Monsun

Ein Drittel der IPCC-Modelle zeigt bei 1,5-2,5 °C globaler Erwärmung das Auftreten von Sommermonsun-Systemen in der Sahelzone. Mit weiterer Erwärmung wird das Auftreten von solchen Dynamikwechseln häufiger und unberechenbarer, was eine Vorhersage erschwert und besonders Indien und China bedroht (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018, S. 191ff.).

2.7.5 Atlantikzirkulation

Auch als Golfstrom bezeichnet, leitet die Atlantikzirkulation warmes Oberflächenwasser aus dem Südatlantik in den Norden, wo sie die Luft im Bereich des Nordatlantiks und Europas erwärmt. Eine geringere Salzwasserkonzentration gefährdet die Zirkulation, da Süßwasser nicht unter das Salzwasser absinkt und damit die Wassermengen nicht mehr angetrieben werden. Eisschmelzen und hohe Niederschläge begünstigen die Reduktion des Salzgehalts, jedoch ist der Zusammenhang mit der menschengemachten Klimaerwärmung und dessen Kipppunkt nicht direkt nachgewiesen (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018, S. 205).

2.7.6 Wälder

Der Rückgang der Regenwälder im Amazonasgebiet lässt sich auf Satellitenbildern bereits erkennen und die Summe des dort gespeicherten CO₂ wird auf 80-120 Mrd. t geschätzt. Im schlimmsten Fall kann die CO₂-Senke bei Dürre zur Quelle werden, was für das Weltklima katastrophale Folgen hätte (McDowell et al., 2018, S. 219). Die Menge entspricht bei aktueller Rate den fossilen CO₂-Emissionen von 8-12 Jahren. Aguiar et al. (2016, S. 22) beziffern den bisherigen Verlust an tropischem Regenwald auf über 20 %. Mit weniger Wäldern wird auch die Luft schwächer befeuchtet, was wiederum eine Dürre bestärkt. Die Pflanzen sind meist nicht an diese Bedingungen angepasst, sterben zunehmend ab und verlieren an Resilienz gegenüber auftretenden Klimaextremen, einem Insektenbefall oder Waldbränden. Von einer bedrohlichen Relevanz lässt sich erst bei deutlich über 2 °C Erderwärmung sprechen, jedoch schließt das nicht die menschlichen Rodungen ein, die den Effekt zusätzlich befeuern.

3 Berechnungstool

3.1 Methode

Es sollen neue Grenzwerte in einem Top-Down-Verfahren entwickelt werden, die innerhalb der Baubranche für Sanierungen und Neubauten verbleiben. In unterschiedlichen Szenarien werden die Bestandsgebäude und aktuelle Bauentwicklungen analysiert und es wird dem Neubau und der Sanierung ein Budget zugewiesen. Je nach Vorhandensein von Daten bezüglich der energetischen Qualität und des Sanierungsbedarfs der einzelnen Gebäudetypen kann die Zuordnung unter Beachtung des Dena-Gebäudereports (Becker et al., 2022) verfeinert werden. Die Szenarien bieten eine Sicherheit, um bei Eintreten der Annahmen das Restbudget zu überwachen. In der konkreten Nutzung sollten Pfade zur Reduktion stetig überwacht werden und gegebenenfalls Anpassungen und Maßnahmen ergriffen werden.

Die Szenarien richten sich nach üblichen Rechenmethoden. Sie werden mit einem realistischen Mittelwert sowie möglichen Varianten innerhalb der erwarteten Berechnungsmöglichkeiten ausgeführt, die auch Best- und Worst-Case-Tendenzen abdecken können. Im ersten Schritt wird die Verteilung von Budgets nachvollzogen. Da jede Variante auf einer Vielzahl von Annahmen beruht und es kein einziges, allgemein anerkanntes Vorgehen gibt, sollen Vergleichsszenarien für bestimmte Variablen aufgestellt werden. Diese werden in den folgenden Berechnungsschritten als Vorschläge jeweils erläutert.

Zuordnung des CO₂-Budgets:

- International nach Vorgaben berechneter CO₂-Budgetwerte
- Betrachtungsumfang der Bilanzierungsphasen
 - Graue Emissionen der Materialien (Scope 3) und Nutzungsemissionen befinden sich vollständig im Budget des Gebäudesektors. Diese Herangehensweise ist sinnvoll für eine umfängliche Berechnung und wurde aus Gründen eines gesamtheitlichen Ansatzes gewählt.
 - Nur die Betriebsemissionen (Nutzung) werden im Gebäudesektor berechnet, Materialien für Baustoffherstellung im Sektor Industrie. Die Methode ist für die Untersuchung ungeeignet, referenziert aber die Sektorentrennung des KSG im Jahr 2023.

- Graue Emissionen der Materialien (Scope 3) befinden sich vollständig im Budget des Gebäudesektors, Nutzungsemissionen werden im Energiesektor angerechnet. Die Methode fördert eine Verschiebung der Emissionen in den Energiesektor, da eine reduzierte Gebäudehülle mit schlechten Dämmeigenschaften das Budget des Gebäudesektors nicht belasten würde. Deshalb wird die Berechnungsmöglichkeit ausgeschlossen.
- Gebäudezuordnung
 - Jeder Quadratmeter gebaute oder sanierte Fläche hat das gleiche Budget zur Verfügung. In der Konstruktion befindliche graue Emissionen gleichen den Mehraufwand oder die schlechtere Bilanz der Nutzungsphase gegenüber dem Neubau aus. Als ausgewogene Methode mit nur einem Budgetwert wird diese Berechnung gewählt.
 - Neubau und Sanierung werden differenziert betrachtet, es werden zwei Budgets aufgestellt. Die Berechnung ist alternativ möglich, jedoch sind weitere Annahmen für die Verteilungskriterien zu treffen.
 - Unterscheidung nach Gebäudenutzung (und Neubau/Sanierung): Budget für Wohnen, Büro, Sport, Bildung, ...
Die Erfordernis eines Verteilerschlüssels je Nutzungsart wird als Ausschlusskriterium gewertet, weshalb die Methode nicht angewandt wird.
 - Zuordnung nach Qualität der Sanierung: Hohe Verbesserung des U-Wertes erlaubt ein höheres Budget oder eine Mindestanforderung (Passivhaus) muss erfüllt sein. Die Methode wurde teilweise integriert, indem ein Mindeststandard festgelegt wird. Eine dynamische Anpassung an energetische Qualitäten würde eine zeitlich verschärfte Budgetanpassung erfordern.

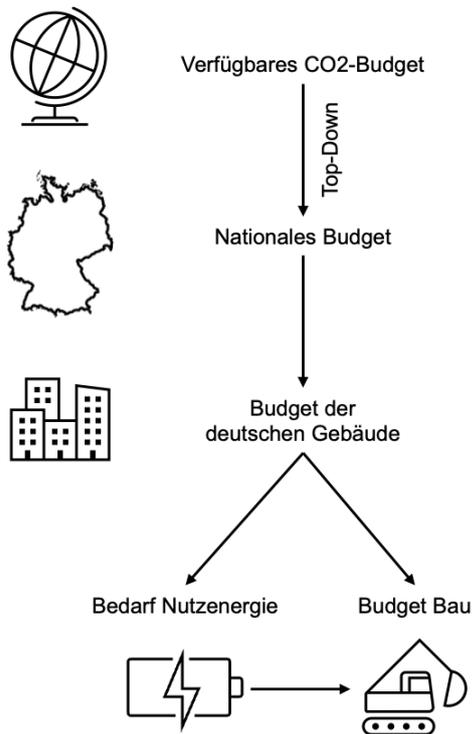


Abbildung 15 Methode zur Berechnung der Budgetwerte (eigene Darstellung)

Eine alternative Berechnung basiert auf den Belegungszeiten nach Personenstunden und bildet die Suffizienz ab. Dieser Ansatz verfolgt den Grundsatz: Je mehr Zeit die Menschen in einem Raum oder Gebäude verbringen, desto höher fällt das zugewiesene Budget aus. Es sind für einige Länder Daten zu Aufenthaltszeiten verfügbar, jedoch erreicht die Methode schnell ihre Grenzen. Für Lagerflächen ist beispielsweise einerseits eine Ausweisung als Arbeitsplatz teilweise möglich, jedoch sind deutlich größere „graue Flächen“ notwendig, für die es keine direkten Daten gibt.

Entwicklung der Baubranche:

- Die Neubaurate stagniert auf nahezu Null, es werden keine neuen Bauflächen ausgeschrieben. Die Sanierungsrate steigt auf ca. 2 %, Ein reduzierter Wohnflächenverbrauch pro Person schafft zusätzliche Wohneinheiten. Neue Anforderungen werden durch Nutzungsänderungen gedeckt.
- Die Neubaurate stagniert auf nahezu Null, es werden keine neuen Bauflächen ausgeschrieben. Die Sanierungsrate bleibt konstant bei ca. 1 %. Neue

Anforderungen werden durch Nutzungsänderungen gedeckt und es herrscht eine Regression in der Baubranche.

- Die Neubau- und Sanierungsraten bleiben konstant. Aktuelle Trends der Baubranche werden über Jahrzehnte fortgeführt. Es wird erwartet, dass die Emissionen in diesem Szenario gegenüber den anderen Varianten höher ausfallen, was eine Einhaltung der Budgets gefährdet.
- Die Neubaurate steigt, es werden bei einem gleichbleibenden Wohnflächenverbrauch pro Person 400.000 Wohnungen werden jährlich geschaffen. Die Sanierungsrate bleibt konstant. Auch in diesem Szenario ist die Einhaltung der Budgets möglicherweise gefährdet.

Für eine flexible Einordnung werden Raten für Abriss, Sanierung und Neubau frei wählbar integriert. Damit ist die Zusammensetzung der Budgets bei der Eingabe differenziert zu bestimmen.

3.2 Berechnung des globalen Budgets

Da seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bereits im Zuge der Industrialisierung ein gesteigerter Ausstoß an CO₂ in die Erdatmosphäre stattfand, ist in Relation zum Referenzzeitraum nach dem Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2018) bereits eine Erwärmung von etwa 1,07 (mit möglichen Abweichungen im Bereich 0,8-1,2) °C zu verzeichnen. Die Klimaziele lassen demzufolge je nach Definition nur eine Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Mittelwert von 1850 bis 1900 zu, der teilweise schon ausgeschöpft wurde. Das Ziel einer Limitierung der Erwärmung von deutlich unter 2 °C lässt demnach nur noch eine Steigerung der Temperaturen von unter 1 °C zu. So kommen unterschiedliche Aussagen zum CO₂-Restbudget Deutschlands zustande (Abbildung 16). Die Budgetermittlung für das Klimaschutzgesetz (KSG) unterscheidet sich im Gesamtbudget nach Knopf und Geden (2022), was auch auf verschiedene Annahmen bezüglich anrechenbarer CO₂-Senken zurückzuführen ist. Die SRU-Berechnung ist jeweils mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit zur jeweiligen Temperaturerhöhung versehen. Gleichmaßen ist im Tool die Wahl der maximalen Zieltemperatur und Eintrittswahrscheinlichkeit wählbar.

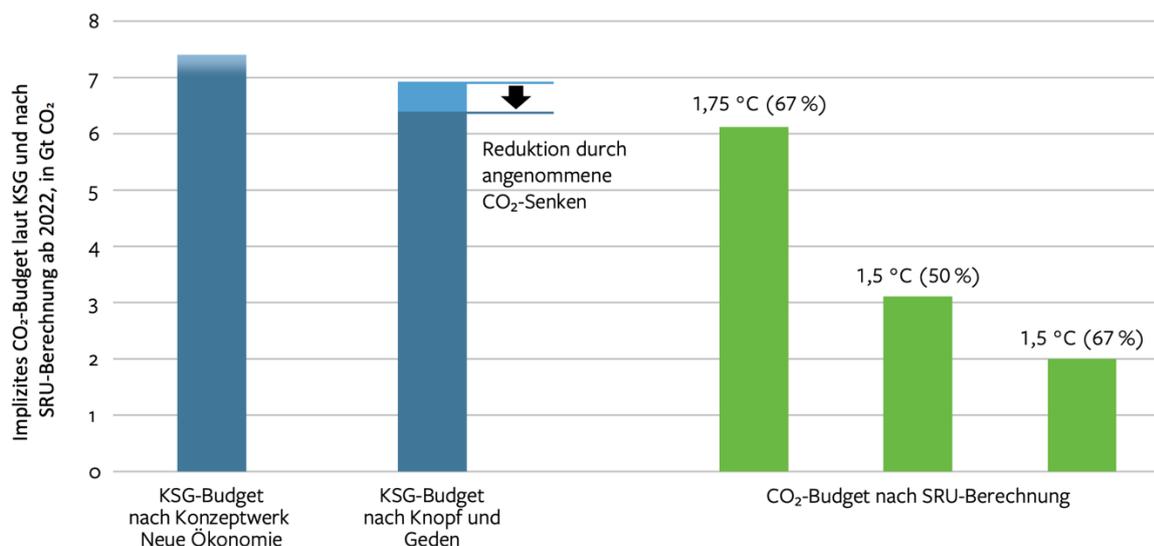


Abbildung 16 CO₂-Budget Deutschland (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2022)
Datenquellen: (Knopf & Geden, 2022); (Konzeptwerk Neue Ökonomie, 2022)

Die Budgetwerte des IPCC werden in der Berechnung berücksichtigt. Andere Werte, wie die Berechnung der NASA, werden hier nicht angewandt. Wie viel CO₂ der Planet Erde ohne Gefährdung der menschlichen Lebensgrundlage aushalten kann, wurde 2021 vom IPCC veröffentlicht. Es wurden verschiedenen Szenarien unterschiedliche CO₂-Budgets zugewiesen. Relevant ist die Erreichbarkeitswahrscheinlichkeit für den jeweiligen zu erwartenden Anstieg der mittleren globalen Temperatur (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018). Unsicherheiten der historischen und nicht durch CO₂ bedingten Erwärmung werden teilweise berücksichtigt. Das IPCC weist aber darauf hin, dass Schwankungen in Bezug auf Emissionen nach 2015 und das Verhalten der Temperatur durch Rückkoppelungseffekte separat zu betrachten sind. Auch ist die Abschätzung des weiteren Verlaufs nach dem Erreichen eines Nullpunkts in der Netto-Bilanz der Treibhausgasemissionen (net zero) unsicher.

Die angegebenen Werte können nach unterschiedlichen Verläufen der CO₂-Emissionen variieren, eine Abweichung der Budgets um +/-220 Gt CO₂ wird als realistisch eingestuft (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018). Die Aktualität der angewandten Daten bezieht sich auf den Jahresbeginn 2020: Ab diesem Zeitpunkt sinken die Budgetwerte in Abhängigkeit zur Menge an ausgestoßenen Treibhausgasen.

Im Berechnungstool können zwei Werte verändert werden. Es besteht die Möglichkeit einer Anpassung des maximalen Erwärmungsziels mit den möglichen Eingabewerten 1,5 °C; 1,7 °C und 2 °C. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist ebenfalls wählbar, gestaffelt in den Schritten der

von dem IPCC veröffentlichten Werte nach 17; 33; 50; 67 oder 83 %. In Anlehnung an das Berechnungsverfahren der CO₂-Uhr des MCC-Berlin (Knopf & Geden, 2022) integriert die Anpassung aktuelle Werte und ermöglicht detaillierte Justierungen der Szenarien.

Für die Berechnung der verbleibenden Zeit bis zum Eintreten der jeweiligen Erwärmung werden die Emissionswerte herangezogen. Zum Zeitpunkt der Beispielberechnung stellt das Global Carbon Project weltweite Zahlen bis 2022 zur Verfügung, wobei auf Unsicherheiten bezüglich der Auswirkung von Landnutzungsänderungen hingewiesen wird. Für tagesaktuelle Berechnungen müssen Annahmen getroffen werden. Es wird ein konstanter Ausstoß ohne Änderungen zum Vorjahr angesetzt, jedoch können Werte bei Veröffentlichung aktueller Daten überschrieben werden. Die aktuellste Anpassung im Tool stellen die Werte nach dem Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2024) dar, welche eine Aktualisierung der ursprünglichen Budgetwerte vornehmen. Dabei werden von den Budgets im Jahr 2020 die bereits emittierten Mengen an CO₂ abgezogen, um für 2023 bzw. 2024 gültige Restbudgets zu ermitteln. Nach dem gleichen Verfahren ermittelt das Tool die zwei Budgetwerte, die sich auf den Tag der Auswertung und das Restbudget zu Jahresbeginn beziehen. Konkrete Werte werden im Kapitel 4 „Berechnungsbeispiel“ angewandt.

Der tagesaktuelle Budgetwert wird aus dem Startbudget im Jahr 2020 abzüglich der bereits emittierten Menge an CO₂ errechnet. Das Ergebnis wird als Budget in Mrd. t CO₂ dargestellt und ein verbleibendes Zeitfenster bei konstant bleibendem Ausstoß bis zum Erreichen des Temperaturlimits wird zur Veranschaulichung errechnet. Der Wert aktualisiert sich sekundlich und zeigt das Budget zum Zeitpunkt der letzten Änderung im Tool. Für die weitere Berechnung wird das Anfangsbudget des aktuellen Kalenderjahres herangezogen, um Ungenauigkeiten zu reduzieren.

3.3 Berechnung des nationalen Budgets

Auf nationaler Ebene gibt es diverse Herangehensweisen, um die Aufteilung des Budgets zu berechnen. Die Sinnhaftigkeit der Methoden muss auf den Zweck der Berechnung abgestimmt und entsprechend beurteilt werden. Eine klare Vorgabe zur Berechnung ist den Pariser Klimazielen nicht zu entnehmen, was den einzelnen Ländern Freiraum zur Gestaltung der eigenen Budgets lässt. Folgende Szenarien werden zur Berechnung angeboten:

Nach Einwohnerzahl (equal per capita): Der Anteil an der Weltbevölkerung bestimmt das Budget. Jedem Menschen steht weltweit ein gleiches Budget zur Verfügung. Für Deutschland würde mit einem Anteil an der weltweiten Bevölkerung von 1,04 % (Statista, 2023) der gleiche Verteilerwert gelten. In einer 2024 vorgenommenen Aktualisierung nennt der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2024) Budgets, die von diesem Wert in der Größenordnung von unter 5 % abweichen. Damit wird die Berechnung in ihrer Größenordnung als realistisch verifiziert. Abweichungen kommen durch ungleichmäßige Bevölkerungsentwicklungen zustande. Die Definition eines Berechnungszeitpunktes fordert eine Datenaktualität zu diesem Moment, der in den Angaben der SRU im Jahr 2016 und somit vor dem Zeitpunkt des Berechnungstools liegt. Daraus resultieren leicht abweichende Ergebnisse in der Methode. Falsche Anreize werden durch eine mehrfache Neuberechnung des Budgets gesetzt, da eine zunehmende Bevölkerungszahl einem Betrachtungsrahmen ein höheres Budget zuteilen würde, während steigende Bevölkerungszahlen bei einem gleichbleibenden Wohlstandsniveau zu erhöhten Emissionen führen.

Nach Bruttoinlandsprodukt (BIP; EU Sharing): Mit einem überdurchschnittlich hohen BIP würde Deutschland 3,68 % des globalen CO₂-Budgets zugeteilt bekommen. Damit werden Ländern mit einer umsatzstarken Wirtschaft höhere Grenzwerte zugeschrieben. Die Methode findet sinnvoll Anwendung, wenn der Industriesektor für einen großen Anteil an CO₂-Emissionen verantwortlich ist und gleichzeitig überwiegend an der Höhe des BIP beteiligt ist. Die Herangehensweise erlaubt jedoch weniger entwickelten Ländern kaum, ihre wirtschaftlich-industrielle Situation zu verbessern (Gerten, 2020).

Relative Verteilung nach Endverbrauchsausgaben (final consumption expenditure): Dieser Ansatz verbindet hohe Kaufkraft mit gesteigerten Emissionen, was wiederum große Budgets den bereits emissionsstarken Akteuren zuspricht. Mit einer Maximierung des Wohlstands einhergehend findet diese Methode zur Berechnung des Budgets im Tool keine weitere Aufmerksamkeit, da sie eine Spiralentwicklung zum Emittieren großer Mengen an CO₂ animieren würde.

Nach BIP umgekehrt (Ability to pay): Da Länder mit hoher Wirtschaftskraft diese teilweise in Zusammenhang mit früheren hohen Emissionen erlangt haben, verfolgt eine Methode den Ansatz, wirtschaftlich starken Ländern weniger Budget zuzuweisen. Sie soll unterentwickelten Ländern die Chance geben, über vorübergehend hohe Emissionen eine starke Wirtschaftskraft

aufzubauen und die Konkurrenzfähigkeit zu steigern (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018). Die Berechnung erfolgt dabei in einem Verhältnis von Einwohnerzahl des jeweiligen Landes zur Gesamtbevölkerung im Produkt zu der Relation aus BIP des Landes zur Einwohnerzahl geteilt durch die Weltbevölkerung zur weltweiten Wirtschaftskraft. Die Anrechnung erfolgt nach einem 10 %-Satz, mit dem sich überhöhte Emissionen negativ auf das Budget auswirken. Am deutschen Beispiel liegt das BIP 2023 pro Kopf etwa 3,55-mal höher als der weltweite Durchschnitt, weshalb die nach Bevölkerung zustehenden 1,04 % des Gesamtbudgets um 0,36 Prozentpunkte reduziert werden (Statistisches Bundesamt, 2024) und eine Zuteilung von 0,68 % verbleibt.

Nach Fläche: Die Fläche eines Betrachtungsraumes wird in Relation zur weltweiten Festlandfläche gesetzt und bestimmt das zugewiesene Budget. Da das Tool sich auf die von Menschen verursachten CO₂-Emissionen bezieht und einige Teile der Welt kaum oder nicht bewohnbar sind, scheint diese Methode nur für vereinzelte Anwendungen sinnvoll zu sein. Nur 0,24 % (Umweltbundesamt, 2023e) der zukünftigen, weltweiten Emissionen dürfe Deutschland verursachen.

Grandfathering (status quo/grandfathering (SBTi)): Über die historische Entwicklung, aus der aktuelle Emissionswerte hervorgehen, werden Limits für die Zukunft berechnet. Das Prinzip beruht darauf, dass jeder Betrachtungsraum die gleichen relativen Einsparungen im Verhältnis zum aktuellen oder vergangenen CO₂-Ausstoß realisieren soll. Die Grenzwerte können teilweise prozess- oder branchenabhängig weiter angepasst werden. Das Prinzip erlaubt den wirtschaftlich starken Ländern weiterhin hohe Emissionen, während den weniger entwickelten Ländern von Beginn an nur geringe Budgets eingestanden werden (Lise Hvid Horup et al., 2022, S. 4-5). In der Berechnung ist wählbar, welches Jahr referenziert werden soll. Für das Jahr 1990 wäre beispielsweise in Deutschland ein abgeleitetes Budget von 4,62 % (Umweltbundesamt, 2021) verfügbar. Eine Auswahl der Referenzjahre 1990-2022 ist möglich, um jahresspezifische Daten zu simulieren.

Nach Biokapazität: Auf Grundlage von Daten des Footprintnetworks wird eine weltweite Biokapazität definiert, zu der die deutsche Biokapazität ins Verhältnis gesetzt wird (One-Planet Alliance, 2023). Die Methode stellt eine verfeinerte Ermittlung der Flächenberechnung dar, unter welcher die Erde biologische Ressourcen erneuern kann und berücksichtigt weitere Einflussgrößen. Deutschland würde dabei 1,12 % (One-Planet Alliance, 2023) des Budgets

erhalten. Diese Methode stellt einen positiven Anreiz, beispielsweise über das Pflanzen von Bäumen, die eigene Biokapazität eines Landes zu erhöhen und bietet über einen geografischen Bezugsrahmen eine Zuordnung an Regionen oder innerhalb frei definierter Grenzen, sofern es die Datenverfügbarkeit zulässt.

3.4 Bauaktivität

3.4.1 Budgetzuordnung in der Baubranche

In Deutschland fallen nach Angaben des BBSR über 40 % der CO₂-Emissionen direkt und indirekt auf den Gebäudesektor zurück (Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.), 2020). An den Gesamtemissionen entfällt ein Anteil von 7 % auf die Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Bauwerken. Nach den Kategorien des Klimaschutzgesetzes (KSG) ist die Zuteilung weitaus komplexer. Die Budgets der Einzelkategorien weichen von den Vorgaben der UN-Berichterstattung ab, jedoch sind die Gesamtsummen identisch. So können direkte Emissionen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe dem Gebäude zugeschrieben werden. Herstellungsemissionen fallen aber auf den Industriesektor und Transporte zur Baustelle oder in der Herstellung auf den Verkehrssektor zurück. Auch die aufgewandte Energie zur Beheizung mit beispielsweise einer Wärmepumpe zur Wärmegewinnung im Gebäude oder Emissionen aufgrund des Energiebedarfs in den Industrieprozessen sind nicht dem Gebäude, sondern der Energiewirtschaft zugeordnet. Aufgrund dieser unzureichenden Datensätze wird die Berechnung auf Basis der Angaben des BBSR angestellt.

3.4.2 Gebäudebestand

Der aktuelle Gebäudebestand wird vereinfacht in Wohn- und Nichtwohngebäude unterteilt dargestellt. Belastbare Daten werden dem Dena-Gebäudereport (Becker et al., 2022) entnommen, der jährlich erscheint. Der aktuelle Bestand soll in Fläche (m²) angegeben werden, um die Grundlage für eine spätere Berechnung des Emissionsbudgets pro Quadratmeter zu gewährleisten. Die Daten wurden nach Hörner et al. (2021) um Erhebungen zu Nichtwohngebäuden ergänzt. 3.967,86 Mio. m² Wohngebäudefläche summieren sich mit 3.507,00 Mio. m² Nichtwohngebäudefläche zu 7.474,86 Mio. m² Gebäudebestandsfläche.

Die Werte beziehen sich auf Wohngebäude und GEG-relevante Nichtwohngebäude. Die Betrachtung umfasst demnach Bauten, die beheizt sind und dementsprechend für die Budgetberechnung herangezogen werden. Da die Baubranche einer hohen Volatilität unterliegt, können die drei Raten für Neubau, Sanierung und Abriss im Tool manuell gewählt werden. Die lassen sich in Prozent angeben und es wird ein Zeitraum für den Sanierungszyklus definiert. Dieser beschreibt die Zeit, bis ein neu erstelltes oder bereits saniertes Gebäude einer erneuten Sanierung unterzogen wird. Es wird eine Eingabe in Abhängigkeit des festgelegten Lebenszyklus von 50 Jahren empfohlen. Die Werte der Raten beziehen sich dabei jeweils auf die Neuerstellung, Sanierung oder den Abriss des im Vorjahr vorhandenen Gebäudebestands. Abgerissen werden im Tool bevorzugt Gebäude aus dem Altbestand, die schlechtere energetische Werte aufweisen, um in Anlehnung an die EU-Gebäuderichtlinie besonders hohe Sanierungsraten unter den schlechtesten Gebäuden zu realisieren (European Commission - Directorate-General for Energy, 2024).

Welcher Anteil am Gesamtgebäudebestand bereits den Mindeststandard erfüllt, ist ebenfalls frei wählbar. Als Referenzwert gilt ein Anteil von 2,5 %. Diese Größenordnung beschreibt die Effizienz von Wohnimmobilien, die im Jahr 2021 mindestens mit der Energieeffizienzklasse A+ ausgezeichnet auf dem Onlinemarkt zur Verfügung gestellt wurden (McMakler GmbH, 2021). Diese Effizienzklasse umfasst Gebäude, die als Passivhaus, Null-Energie-Haus oder als Effizienzhaus-40-Standard definiert sind und den definierten Mindeststandard einer Sanierungsmaßnahme erfüllen.

Es wird ein einheitliches Emissionsbudget für die Neuerstellung und Sanierung von Gebäuden definiert. Zu berücksichtigen ist, dass sowohl Neubau- als auch Sanierungsprojekte den zuvor beschriebenen Mindeststandard einhalten und eine Unterteilung in Sanierung und Instandhaltung gegeben ist. (vgl. 2.3 Definition des Maßnahmenumfangs)

3.5 Nutzungsemissionen

Im Tabellenblatt „Nutzung“ gibt es drei Möglichkeiten, die zukünftigen Emissionen aus der Nutzung und dem Betrieb von Gebäuden auszuwählen. Die erste Variante berechnet ab dem Jahr 2021 eine lineare Reduktion der Betriebsemissionen bis zum politisch angestrebten Jahr 2045 (Luderer et al., 2021). Dafür wird ausgehend von deutschen Emissionswerten im Basisjahr mit dem Faktor der Nutzungsemissionen als Anteil an den Gesamtemissionen ein jährlicher Wert ermittelt, der entsprechend der Reduktionspfade geschmälert wird. Die Summen der jährlichen Emissionen ab 2024 werden übertragen, da die Budgeterrechnung ab

2024 ansetzt. Nach Angaben des Umweltbundesamt (2024) lagen 2023 die deutschen Treibhausgasemissionen bei 674 Mio. t CO₂. Unter Anwendung des in Kapitel 3.6 Umrechnung des CO₂-Budgets in ein Treibhausgasbudget betrachteten Umrechnungsfaktors und dem Faktor 33 % Referenzanteil der Nutzungsemissionen nach dem Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.) (2020), ergeben sich 195,73 Mio. t CO₂ bezüglich der Nutzungsemissionen. Abgeglichen mit der Berechnung im Tool, die ab 2020 eine Prognose anhand der linearen Reduktion vornimmt, ergibt sich für 2023 ein Wert von 195,66 Mio. t CO₂. Dieser gleicht nahezu dem Kontrollwert.

In der Variante 2 geht das Tool ähnlich vor und versetzt die jährlichen Emissionen zusätzlich mit der zuvor angegebenen Information über Abriss und Sanierung. Daraus errechnet sich ein geringerer Bedarf, da von einem erhöhten Standard in sanierten Gebäuden und Neubauten ausgegangen wird, wie er zuvor definiert wurde. Entsprechend dieser Angaben werden die Emissionen pro Quadratmeter Bestandsfläche linear bis zum Neutralitätsziel 2045 (Luderer et al., 2021) gesenkt.

Die dritte Variante hält eine umfangreiche Berechnungsmöglichkeit bereit, die sich nicht auf ein Zieljahr der Emissionsneutralität bezieht, sondern prozentuale Optimierungsschritte errechnet. Dabei wird über die Angabe zu Energieträgern für Wärme- und Kältebereitstellung ein Transformationsprozess beschrieben. Von der Verteilung von Kälte- und Wärmeerzeugern im Jahr 2020 ausgehend wird die schrittweise Erneuerung und Umstellung der Anlagen auf nachhaltige, emissionsarme Alternativen in jährlichen Schritten prozentual angegeben. Außerdem können Annahmen für die Effizienzsteigerung von Wärmepumpen getroffen werden. Es werden vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2023) die CO₂-Faktoren den jeweiligen Energieträgern zugewiesen und diesen wiederum eine stufenweise Verbesserung der Emissionen zugeteilt. Bei den Systemen, die sich aufgrund ihrer Energiebereitstellung nicht ausschließlich an fossilen Energieträgern bedienen, können Optimierungspotentiale ausfindig gemacht und angerechnet werden. Hinzugerechnet werden Emissionen aus dem Strombedarf, der nicht in Wärme- und Kältebereitstellung abgebildet wird. Auf diesen Bedarf wird der Faktor des Strommixes angewandt, der nicht aus ausschließlich erneuerbarer Energie gespeist wird. Dafür wird wiederum der gebäudebezogene Endenergiebedarf nach dem Umweltbundesamt (2023a) abzüglich der bereits genannten Verbrauchssparten bewertet.

3.6 Umrechnung des CO₂-Budgets in ein Treibhausgasbudget

Da verschiedene Treibhausgase in ihrer Flüchtigkeit stark variieren und teilweise über mehrere Hundert Jahre in der Atmosphäre wirken, wird die Empfehlung des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2022) für die Berechnung herangezogen. Dabei werden auch Eigenschaften, wie die Wärmeabsorption oder -reflektion, berücksichtigt. Der verbindlich festgelegte Zeithorizont beträgt 100 Jahre (GWP100) und die Werte beruhen auf dem vierten Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2018), der voraussichtlich noch 2024 überholt werden soll. So wird die Einheit „Tonnen CO₂-Äquivalente“ für Treibhausgase uniform eingesetzt. In der Atmosphäre kommt beispielsweise Lachgas (Distickstoffoxid, N₂O) nur in geringen Mengen vor, hat aber mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 121 Jahren eine etwa 298-fache Wirkung gegenüber CO₂. Es entsteht beim Abbau stickstoffhaltiger Verbindungen durch Mikroorganismen im Boden oder chemischen Industrieprozessen und wirkt sich trotz seinem minimalen Vorkommen mit großer Bedeutung auf den anthropogenen Treibhauseffekt aus. Anwendung findet die Berechnung auch für Methan (CH₄), wasserstoffhaltige Kohlenwasserstoffe (HKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), Schwefelhexafluorid (SF₆) und seit 2015 Stickstofftrifluorid (NF₃), welches aber nur in geringsten Mengen auftritt (Umweltbundesamt, 2022). Mit einem Wirkungsanteil von CO₂ an der Gesamtwirkung von 88% im Mittel der Jahre 2011 bis 2020 (Umweltbundesamt, 2021), wird das errechnete Budget direkt proportional auf ein Treibhausgasbudget erweitert.

3.7 Berechnung der Szenarien

Bezüglich des verbleibenden Budgets kann der Wert der BBSR überschrieben werden, wenn beispielsweise kein weiteres Budget für den Bau der Verkehrsinfrastruktur zur Verfügung gestellt werden soll oder andere Datenquellen angewandt werden. Optional kann für den Startwert angegeben werden, welcher Anteil des Gebäudebestands im Jahr 2021 den Standard an einen Neubau oder eine Sanierung erfüllt, um erst nach Ablauf des Sanierungszyklus wieder in die Kategorie des unsanierten Bestands zu fallen.

Aus den Dateneingaben für die Szenarien wird das nationale Budget dem neu definierten Gebäudesektor für Wohn- und Nichtwohngebäude zugeordnet. Dargestellt werden die Werte

am Zeitstrahl als Tsd. m². Der Startwert aus der Fläche der Bestandsgebäude wird über den Faktor aufgeteilt, der den Anteil der Gebäude auf Neubaustandard angibt. Ausgehend von der jährlichen Flächensumme werden die Werte für Neubau, Sanierung und Abriss im Folgejahr ermittelt. Sollte es unzureichend nicht sanierte Flächen geben, wird die Sanierung innerhalb der Berechnung pausiert. Gleichermaßen würde es keinen Abriss geben, wenn der Bestand bereits vollkommen rückgebaut wäre. Die Abrisszahlen werden mit Präferenz den nicht sanierten Flächen abgezogen. Der Sanierungszyklus bezieht sich auf das Baujahr oder die letzte Sanierung einer Fläche. Nach Ablauf der angegebenen Erwartung wird die Fläche, unabhängig von Neubau oder Sanierung, erneut dem unsanierten Bestand zugewiesen, um im Folgejahr einer Sanierung unterzogen zu werden.

Daraus ergibt sich jährlich eine neue Bestandssumme aus dem Vorjahr, abzüglich der Raten des Abrisses und zuzüglich des Neubaus. Davon unterteilt errechnet sich die unsanierte Bestandsfläche abzüglich der Sanierungsmaßnahmen zuzüglich der Flächen nach Ablauf des Sanierungszyklus.

Zimmermann und Reiser (2021) berechnen für den Lebenszyklus eines Wohngebäudes über 80 Jahre Nutzungsdauer eine Verteilung der grauen Energie von 34 % für den Rohbau, 27 % für die Fassade und 39 % für den Ausbau und die technische Gebäudeausstattung (TGA). Die Nutzungsdauer weicht bei den Anteilswerten von der gewählten, üblichen Dauer von 50 Jahren ab (Roth, 2011), kann aber als Referenz für die Größenordnung der Emissionsverteilung herangezogen werden. Zu beachten ist eine Verschiebung zugunsten der Konstruktion bei einer Betrachtung über 80 Jahre Lebensdauer.

Die Zukunftsszenarien im Gebäudebetrieb werden über einen eigenen Rechenschritt festgelegt. So werden aktuelle Werte für die Leistung der Wärmeerzeuger mit den vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2023) bindend vorgegebenen CO₂-Faktoren für Energieträger hinterlegt. Der Berechnungsschritt lässt sich durch konkrete Reduktionsfaktoren umgehen und für eine vereinfachte Berechnung überschreiben. Betriebsemissionen stellen meist den überwiegenden Anteil der Emissionen im Gebäudelebenszyklus dar. Mit verbesserten Dämmwerten verändert sich das Verhältnis in den letzten Jahren in Richtung der grauen Emissionen aus der Materialgewinnung und Herstellung. So emittiert der Sektor Betrieb und Nutzung 74,6 % der 398 Mio. t CO₂-Äq.-Emissionen im Jahr 2015 (Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.), 2020, S. 16). Die Berechnung kann übersprungen werden, wenn konkrete Werte vorliegen oder eine lineare Reduktion aktueller Emissionswerte angenommen werden.

THG-Emissionen aus Errichtung und Nutzung

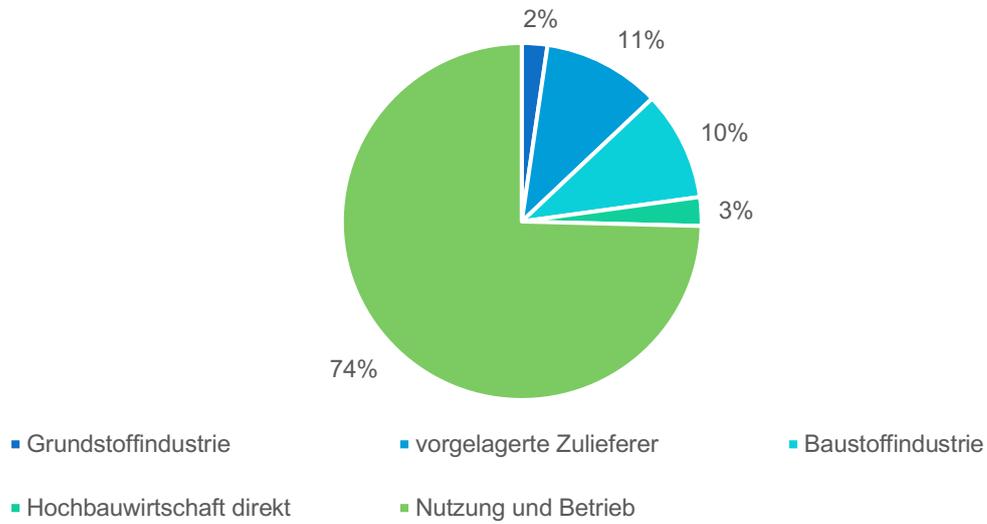


Abbildung 17 Treibhausgasemissionen aus Errichtung und Nutzung von Hochbauten, eigene Darstellung nach Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.) (2020)

4 Berechnungsbeispiel

Unter der Annahme einer schnellen Reduktion energiebedingter Emissionen wird vom Gesamtbudget des Bausektors nur ein Teil abgezogen, was den Verbleib eines Restbudgets ermöglicht. Exemplarisch soll im Folgenden ein realistisches Szenario berechnet werden. Die Frage nach der moralischen Angemessenheit soll nicht Teil dieser Arbeit sein. In diesem Beispiel werden Referenzwerte anerkannt und keine detaillierten Überschreibungen vorgenommen. Das Tool bietet bei Bedarf an einigen Stellen eine tiefere Justierung der Angaben, um genauere Ergebnisse zu erhalten.

Aus der Vorgabe des Pariser Klimaschutzabkommens wird mit 1,7 °C ein Ziel deutlich unter 2 °C Erderwärmung gewählt. Eine Wahrscheinlichkeit von 67 % definiert dabei eine realistische Chance der Einhaltung. Das 2020 zur Verfügung stehende Budget entspricht demnach 700 Mrd. t CO₂. Abzüglich der Emissionen der Jahre 2020 bis 2023, die 145,8 Mrd. t CO₂ betragen, verbleibt zum Jahresbeginn 2024 ein Restbudget von 554,2 Mrd. t CO₂. Die bereits emittierten Emissionen werden auf Basis des Global Carbon Project (2023) berechnet und zu Jahresbeginn des Berechnungsdatums ermittelt. Eine tagesaktuelle Auswertung würde am 29.05.2024 ein Restbudget von 539,19 Mrd. t CO₂ ergeben, was im Tool als Information bereitgestellt wird, aber nicht als Grundlage in der Berechnung dient.

Im nationalen Budget wird die Verteilung nach Einwohnerzahl gewählt (Version 1). Mit 84 Mio. Menschen stellt die Bevölkerung Deutschlands an der Weltbevölkerung von 8,1 Mrd. Menschen einen Anteil von 1,04% dar. Ein nationales Budget von 5,75 Mrd. t CO₂ wird der Bundesrepublik zugewiesen.

Der Referenzanteil von 40,2 % für den Gebäudesektor an den deutschen THG-Emissionen wird nicht überschrieben, woraus sich ein Gebäudebudget von 2,31 Mrd. t CO₂ berechnet. Die Raten der Bauaktivität werden auf 1 % Neubau, 1,5 % Sanierung und 0,5 % Abriss gesetzt, wodurch die Fläche des Gesamtbestands in Zukunft zunehmend ist, um entsprechend einer wachsenden Weltbevölkerung ausreichend Wohnraum bereitzustellen. Gegenwärtig wächst die Weltbevölkerung mit etwa 1 %, wobei die Wachstumsrate bis 2100 nach Prognosen im Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (2022) auf unter 0,1 % sinken wird, während in Deutschland bereits jetzt geringere Wachstumszahlen verzeichnet werden. Der Startwert beträgt im Jahr 2021 7,4 Mrd. m² Bestandsfläche. Außerdem wird der Anteil des energetischen Mindeststandards am Bestand bei 2,5 % belassen. Die Abbildung 18 visualisiert die Zusammensetzung der deutschen Gebäude bis 2050. Daran ist zu erkennen, dass auch im Jahr 2050 noch einige Gebäude unsaniert aus dem Altbestand vorhanden sind. Das können sowohl Gebäude sein, die sich heute schon durch eine mangelhaft gedämmte Gebäudehülle

auszeichnen als auch aktuell nur knapp außerhalb des definierten Mindeststandards liegen. Daher wird vorausgesetzt, dass Heizungen der Gebäude im Bestand, die aktuell mit fossilen Energieträgern beheizt werden, unabhängig von Komplettsanierungen erneuert oder mit emissionsfreier, nachhaltiger Energie betrieben werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine frühere Emissionsneutralität der Betriebsenergie erzielt wird.

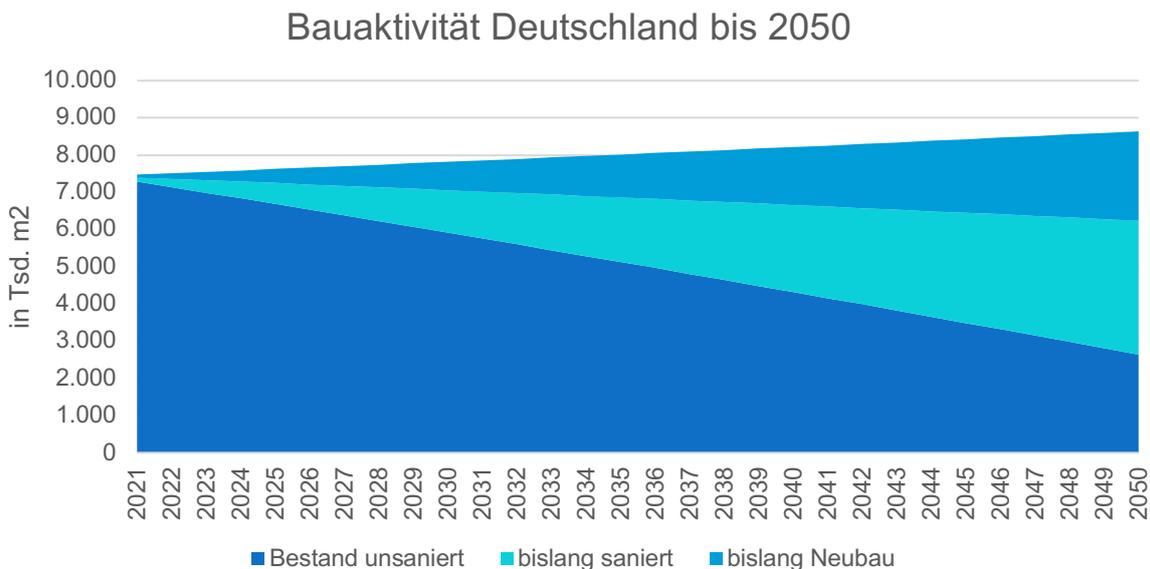


Abbildung 18 Prognose des Gebäudebestands in Deutschland auf Grundlage der Eingaben

Im Berechnungsschritt zu den Nutzungsemissionen wird Variante 2 mit einer Reduktion bis 2045 unter Berücksichtigung des Altbestands gewählt. Das Szenario beinhaltet einen jährlich lineareren Rückgang der Emissionen des Gebäudebestands ohne Neubauten und sanierte Gebäude, die mindestens den Passivhausstandard erreichen. Abzüglich der Nutzungsemissionen von 1,70 Mrd. t CO₂ verbleibt ein Budget von 620 Mio. t CO₂ für die zukünftige Gebäudeerstellung. In Variante 3 wäre eine differenzierte Betrachtung der Emissionen vorzunehmen, während eine Reduktion von Emissionsfaktoren auf Basis der Werte vergangener Jahre prognostiziert wird. Dabei wird eine Erreichbarkeit der Treibhausgasneutralität erst einige Jahre nach 2045 erreicht, was zu höheren Emissionen führen würde. Die Emissionsfaktoren je Energieträger für die Bereitstellung von Wärme und Kälte werden dabei integriert.

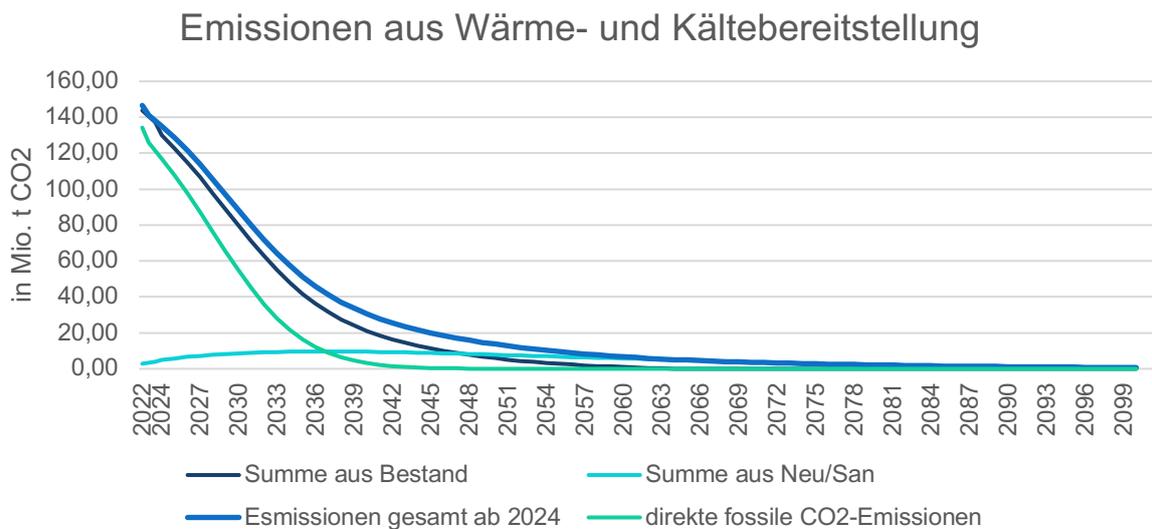


Abbildung 19 Nutzungsemissionen Wärme und Kälte der Berechnungsvariante 1

Über den Treibhausgaswirkungsfaktor von 0,88 wird das CO₂-Budget in ein THG-Budget von 700 Mio. t CO₂ übertragen. Der Berechnungsschritt „CO₂-Aspekte“ bietet zwei Reduktionsmöglichkeiten, es wird die Variante 2 gewählt, die eine Eingabe aktueller Emissionen für die Herstellung und Errichtung eines Gebäudes pro m² erfordert. Die zuvor genannte Studie der DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2021a) zeigte, dass eine Unterschreitung des Referenzwertes von 9,4 kg CO₂-Äq./m²*a wirtschaftlich und technisch realisierbar ist. Außerdem liegt die Gültigkeit der angewandten Environmental Product Declarations (EPSs) einige Jahre zurück und die Emissionen im Strommix wurden reduziert. Daher werden für Bau und Sanierung beispielsweise 5 kg CO₂-Äq./m²*a im Jahr 2021 als möglich angenommen und für die weiteren Rechenschritte angegeben.

Die Berechnung liefert das Ergebnis, dass Bauemissionen bis 2051 linear bis zur Neutralität zu reduzieren sind, um die vorgegebenen Budgetwerte einzuhalten. Im Jahr 2030 betragen sie beispielsweise noch 3,89 kg CO₂-Äq./m²*a. Damit wäre eine weniger ambitioniertere Reduktion der Emissionen nötig, als sie politisch bis 2045 angestrebt wird. Da die Gebäudebranche für einen großen Anteil an THG-Emissionen verantwortlich ist, gefährdet eine Überschreitung des errechneten Budgets die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens.

Der ausführliche Bericht aus den Berechnungen des Tools ist im Anhang beigelegt und visualisiert die Verhältnisse und Berechnungsschritte.

5 Gebäudebilanzierung der Goetheschule

Das 1955 gegründete Gymnasium Goetheschule befindet sich im Franziusweg 43, 30167 Hannover und ist mit ca. 1500 Schülern das Größte der Landeshauptstadt. Das Gebäude wurde 1957 von dem Architekten Harald Leonhard in der Rühlmannstraße 14 erbaut (Gymnasium Goetheschule Hannover, 2023).

5.1 Sanierung und Neubau der vier Gebäudeteile

2017 wurde von PPP-Architekten in einem ersten Bauabschnitt ein Neubau im Passivhausstandard errichtet. Bis im Jahr 2020 wurde im zweiten Bauabschnitt eine Erweiterung mit Sanierung des Bestands realisiert. Eine Gliederung des Gebäudes in vier Teilbereiche wird mit den Buchstaben A bis D betitelt. Während die Bauteile A und B mit der Aula einer Sanierung unterzogen wurden, ist das Bauteil C teils zurückgebaut worden, um eine Erweiterung des Bauteils D mit Dreifeldsporthalle zu ermöglichen. Das gesamte Gebäude mit einer Nutzfläche von 17.685 m² wurde damit an aktuelle Anforderungen von Brandschutz und Barrierefreiheit angepasst. (ppp architekten + stadtplaner gmbh, 2021)

Die Berechnung der Ökobilanzen zur Goetheschule wurde durch M.Sc. Leander Präger in vier Abschnitten entsprechend der Bauteile mithilfe der Software OneClickLCA durchgeführt. Das Programm greift auf Datensätze aus der ÖKOBAUDAT 2021-II (25.06.2021) nach Standard EN15804+A2 zurück und es wird ein Berechnungszeitraum der Gebäudelebensdauer von 50 Jahren zugrunde gelegt. Damit erfüllt die Berechnung nicht den aktuellen Standard des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB), das die Anwendung der aktuellen Version 2023-I vom 15.06.2023 erfordert. Die Ökobaudat beruht auf der Hintergrunddatenbank „GaBi“ und stellt über „zusätzliche Datensätze“ weitere Daten der „ecoinvent“ zur Verfügung, die nur in Ausnahmefällen für die BNB-Zertifizierung zulässig sind (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2024).

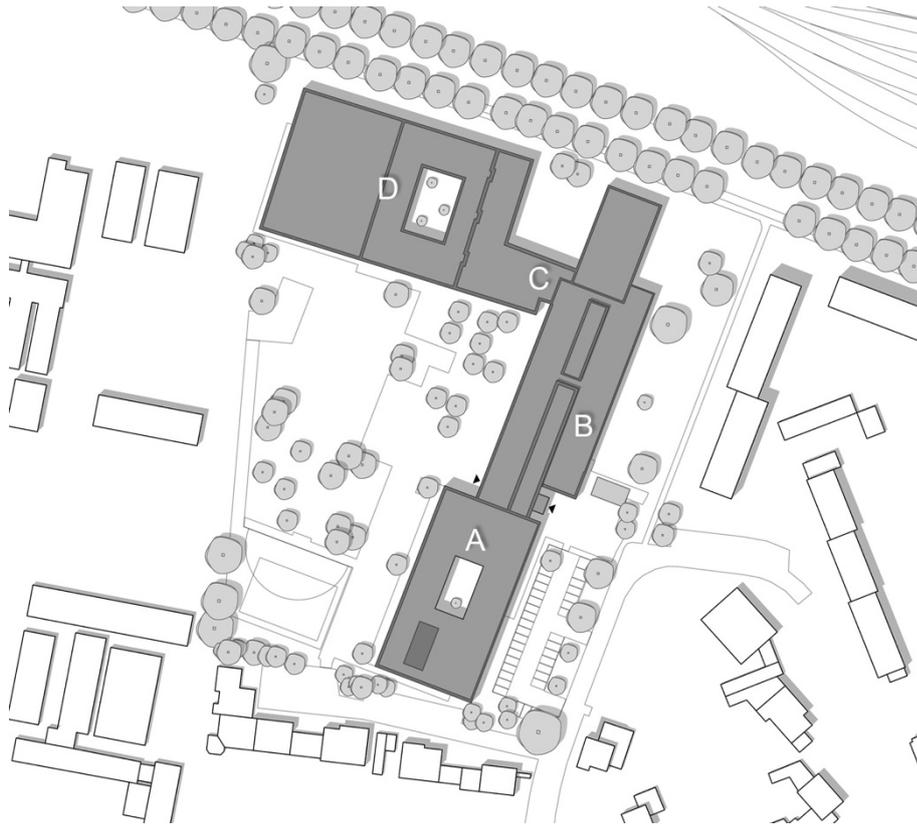


Abbildung 20 Lageplan Goetheschule, verändert durch Autor nach ppp architekten + stadtplaner gmbh (2012)

Da aus dem vorliegenden Energieausweis keine Unterteilung von Bedarf oder Verbrauch nach Gebäudeteil vorliegt, wird vereinfacht eine Aufteilung der Emissionen aus Lebenszyklusphase B6 relativ zur Nutzfläche vorgenommen. Diese Vereinfachung prognostiziert auf Basis der Daten zu Gebäudeteil A einen Gesamtbedarf, da die Bewertung sich auf das vollständige Gebäude im Umfang der Sanierung beziehen soll. Die Einzelwerte dienen der Veranschaulichung im Berechnungstool und lassen eine differenzierte Betrachtung zu, ohne die Summenwerte des Gesamtergebnisses zu beeinflussen. Auf diesem Weg wird eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse eingearbeitet, da im Beispiel der Goetheschule eine Kombination aus Sanierung und Neubau mit unterschiedlichen Qualitäten der Gebäudehülle vorliegt.

5.2 Dynamische Lebenszyklusanalyse des Bauprojekts

Als Grundlage der LCA dient ein Gebäudemodell zur Massenermittlung in der Architektursoftware Revit. Die vier Gebäudeteile wurden für eine separate Ermittlung angelegt, um jeden Abschnitt einzeln im Analysetool OneClickLCA zu bilanzieren. Die Ergebnisse der Bilanzierung sind im Anhang nachzuvollziehen. Aufgrund fehlender Angaben wurden für die Nutzungsphase B6 Angaben aus dem Energieausweis in Relation zu Bauteil A ungeachtet der Unterschiede in der Gebäudehülle über die jeweilige Nutzfläche auf die weiteren Bereiche übertragen. In einer weiteren Variante wurden Materialien des Bestands bilanziert, die weiterhin erhalten bleiben. Dieses Modell dient als Vergleich zur Einordnung des Anteils an weiter genutzten Materialien und führt keine Unterscheidung in Bauteile A-D durch. Die Software OneClickLCA ermöglicht keine Berechnung nach Vorgaben der DGNB, jedoch bietet die LEVEL(s)-Methode eine europaweite Vergleichbarkeit (Gervasio et al., 2018). Das entwickelte Tool zeigt in Zwischenschritten den Vergleich zur DGNB-Bilanzierung, beruft sich im Endbericht aber wieder auf die vollständigen Eingaben, um eine ganzheitliche Betrachtung zu fördern. Für die Vergleichbarkeit verschiedener Gebäude wird vorausgesetzt, dass sie nach den gleichen Rahmenbedingungen bilanziert werden. Pro m² Nutzfläche betragen die Gesamtemissionen der LCA 32,55 kg CO₂-Äq./m²*a.

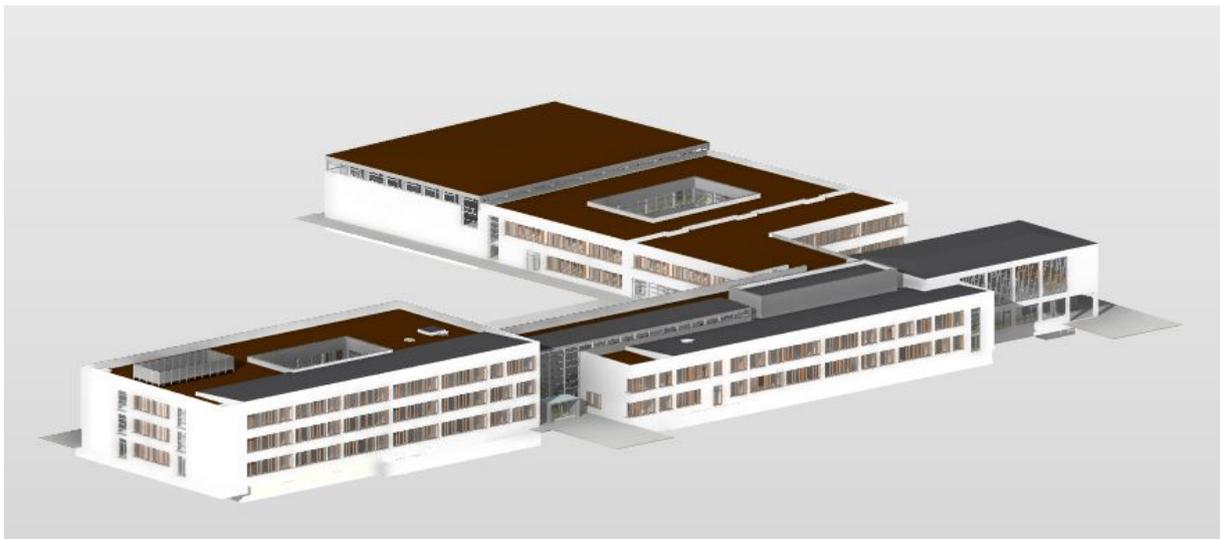


Abbildung 21 Gebäudemodell zur Massenermittlung erstellt von M.Sc. Leander Präger, TUM

Aus der Berechnung ergeben sich auffallend hohe Emissionen für den Betrieb, von durchschnittlich 20,59 kg CO₂-Äq./m²*a in der Nutzungsphase B. In Summe machen energiebedingte Emissionen des Wärmebedarfs 44 % und des Strombedarfs 17 % der Treibhausgase aus. Die 61 % aus verschiedenen Phasen lassen sich zu einem späteren Zeitpunkt der Bauausführung vollständig durch die Bereitstellung emissionsfreier Energie reduzieren. Die Erstellung und Errichtung in der Phase A stellen mit 10,83 kg CO₂-Äq./m²*a etwa die Hälfte der Gesamtemissionen dar. Das Modul D wird bei der Berechnung außer Acht gelassen und im Tool mit dem Wert Null angegeben.

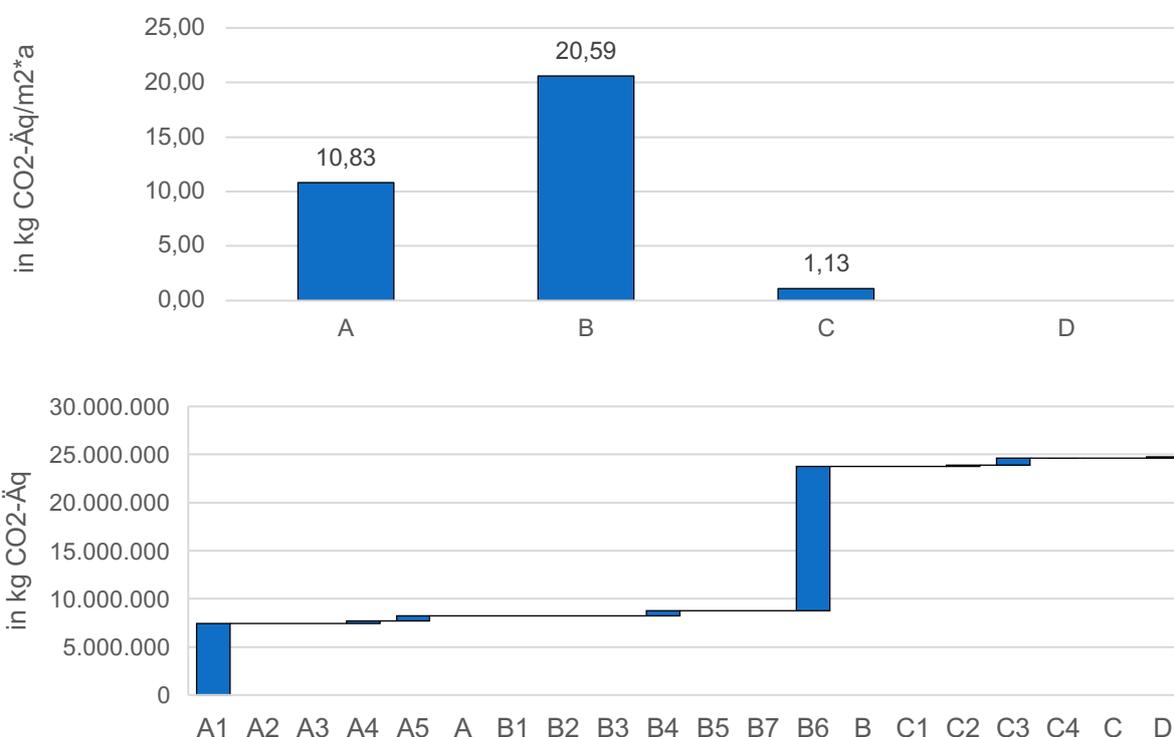


Abbildung 22 Emissionen nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

Die Gesamtemissionen werden anschließend nach Ressourcentyp kategorisiert, um mit Informationen zu energiebedingten Anteilen versehen zu werden. Die Kategorisierung erfolgt nach verfügbaren Datensätzen, wobei Herkunft und Aktualität sich teilweise unterscheiden. Es werden Daten zwischen 2015 und 2020 herangezogen. Materialien ohne weitere Informationen oder mit Emissionsanteilen unter 2% sind unter „andere Ressourcen“ zusammengefasst. Im Berechnungstool sind die jeweiligen Quellen zu entnehmen und bei Verfügbarkeit neuer Daten lassen sich die Werte überschreiben. Im Beispiel der Schule beruhen die Daten der Ökobautat auf dem Gültigkeitsjahr 2021, weshalb keine aktuelleren

Daten eingesetzt werden. Sie betreffen die Materialien in der Phase A, weshalb die Werte übergreifend auf die Einzelphasen A angewandt werden.

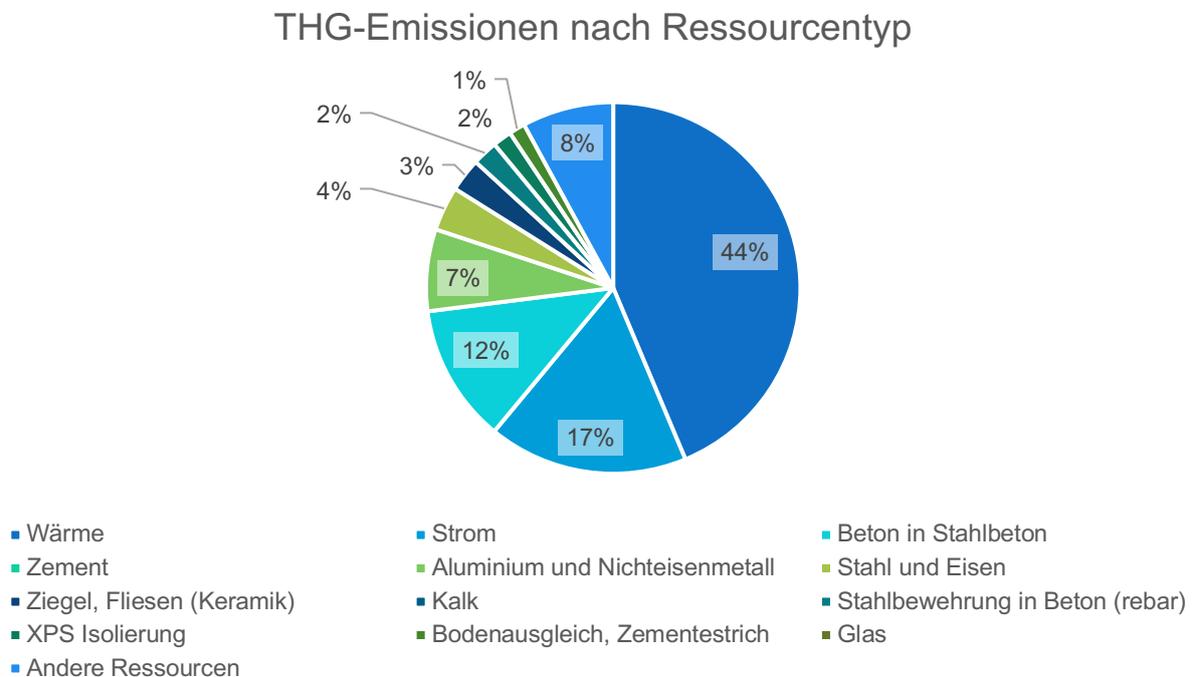


Abbildung 23 THG-Emissionen nach Ressourcentyp (eigene Darstellung)

5.3 Graue Energie in Baustoffen

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) fordert in Anlage 9 GEG eine Angabe zu Treibhausgasen im Energieausweis (Zimmermann & Reiser, 2021). Dementsprechend werden Vorgaben aus dem GEG für die Berechnungsmethodik herangezogen. Die Zusammensetzung der Emissionswerte muss jedoch nicht umfänglich erläutert werden. Aus diesem Grund werden die einzelnen Baustoffe für eine differenzierte Betrachtung kategorisiert.

Die Reduktion des GWP-Bedarfs lässt sich für die Baustoffe zu einem großen Anteil über die graue Energie erreichen. In Produktion und Transport steckt häufig ein hoher Anteil nicht erneuerbarer Energie. Besonders für die Primärkonstruktion wird im Neubau ein überwiegender Anteil der grauen Energie aufgewandt, welche oft mit dem Gewicht korrespondiert (Zeumer et al., 2009). Demnach sollten leichtere Konstruktionen weniger Emissionen aufweisen.

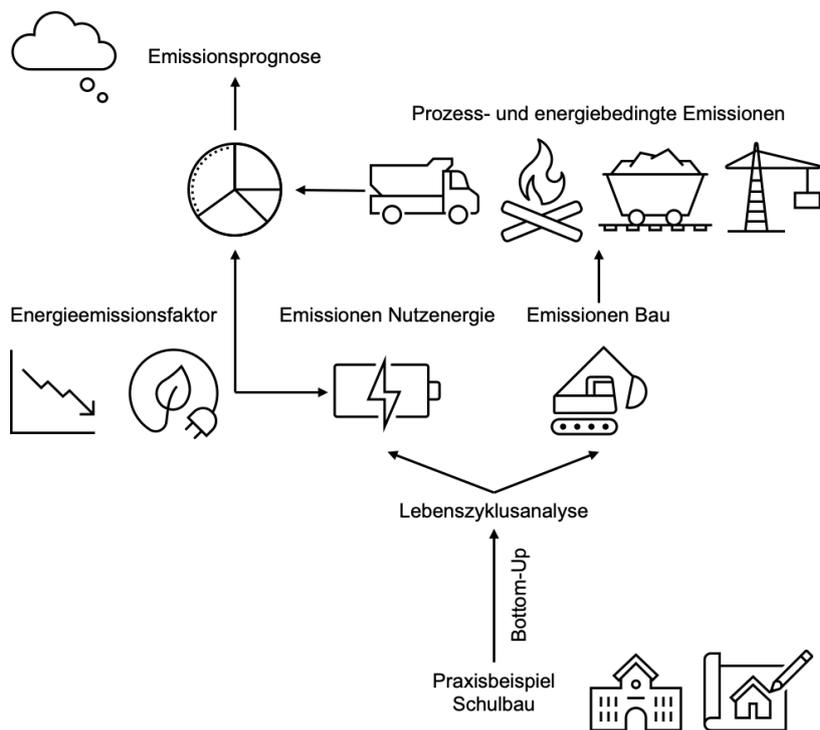


Abbildung 24 Methode der dynamischen Emissionsprognose (eigene Darstellung)

Bei der Herstellung von Beton spielt Zement eine entscheidende Rolle für das GWP. In der Zementherstellung fallen ca. 66 % der CO₂-Emissionen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen zurück. Diese chemischen Reaktionen der Zementherstellung lassen sich nicht einfach umgehen und bedeuten daher nur ein geringes Einsparpotential. Das verbleibende Drittel der CO₂-Emissionen stammt aus den Brennstoffemissionen (Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), 2023). Einige Produktionsprozesse wurden vom Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI) (2023) hinsichtlich des Anteils an prozessbedingten Emissionen in Gewinnung und Produktion untersucht.

Weitere Anteile an energiebedingten Emissionen sind dem Berechnungstool unter „Gebäudedaten“ zu entnehmen. Auffallend ist dabei, dass besonders die Materialien, welche unter hohen Temperaturen bearbeitet oder hergestellt werden, für hohe Emissionen sorgen. Diese können durch ökologisch nachhaltige und emissionsfreie Energie weiter gesenkt werden.

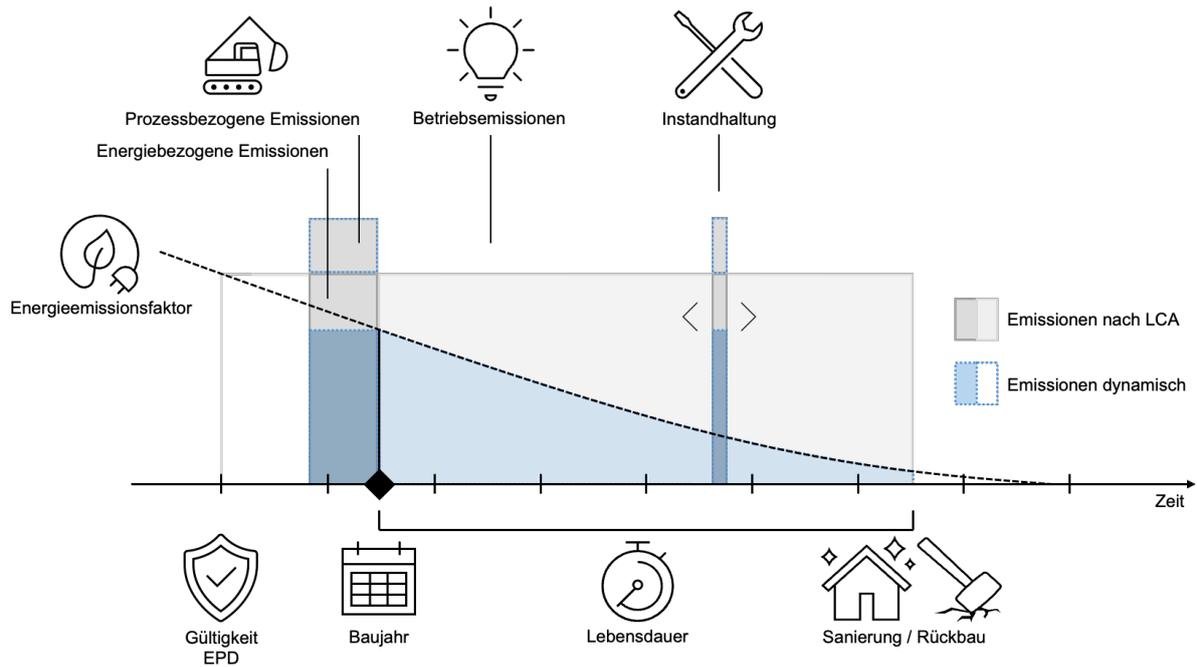


Abbildung 25 Methode der dynamischen Ermittlung von Emissionen am Zeitstrahl (eigene Darstellung)

Methodisch wird die Bewertung durch eine detaillierte Betrachtung überarbeitet. Die Anteile an energiebedingten Emissionen werden mit einem reduzierten Emissionsfaktor multipliziert. Ausgehend von den Ökobilanzdaten und Environmental Product Declarations (EPDs) werden die Emissionswerte aktualisiert, indem eine Emissionsminderung in Relation zum reduzierten Emissionsfaktor des deutschen Strommix zum Zeitpunkt der geplanten Realisierung berechnet wird. Damit wird prognostiziert, wie sich die EPDs in Zukunft verändern werden und welche Optimierung daraus hervorgeht. Anhand der Beispielschule lässt sich eine Größenordnung aufzeichnen, in der ähnliche Gebäude zu einem geplanten Baujahr mit reduzierten Emissionen realisierbar sind. Als Basiswert gilt das Jahr der Berechnung oder der Gültigkeit angewandter Datensätze und EPDs.

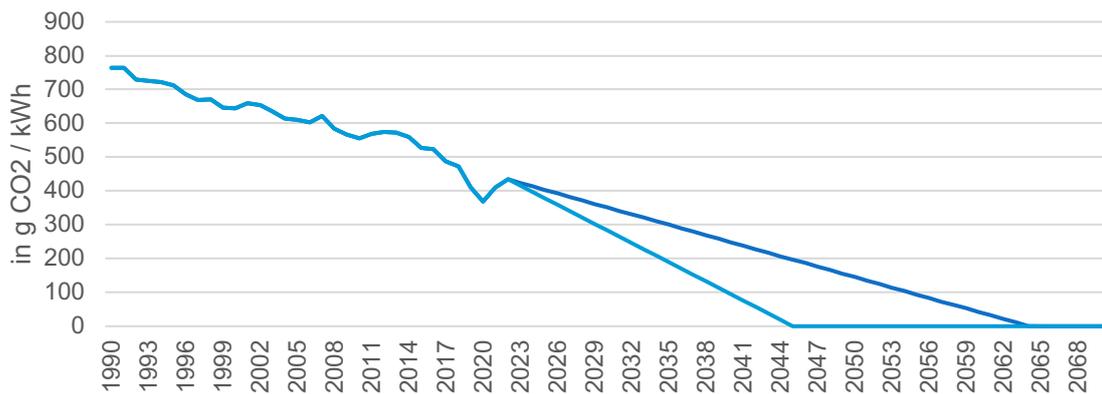


Abbildung 26 Historische Entwicklung der THG-Emissionen im deutschen Strommix auf Grundlage von Umweltbundesamt (2023b) mit fortgeführten Reduktionspfaden (eigene Darstellung und Prognose)

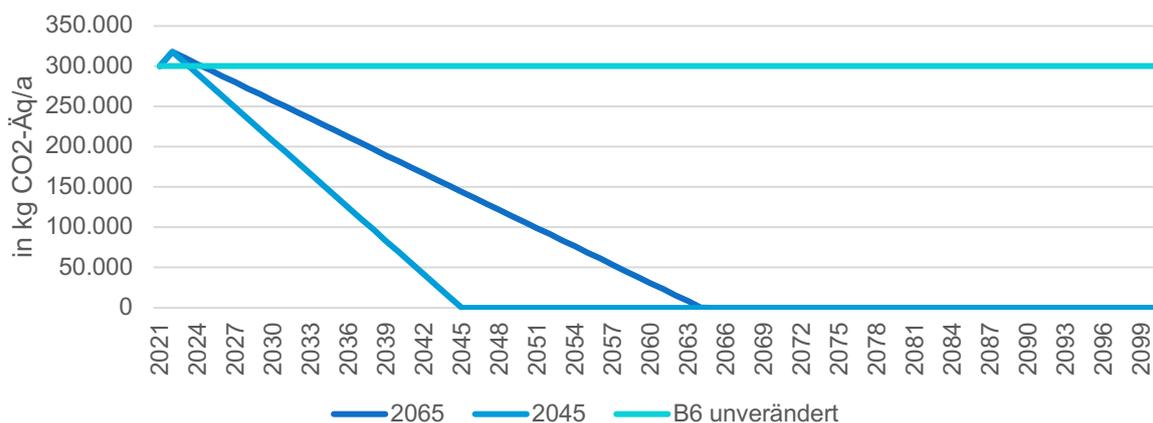


Abbildung 27 Reduktionspfade der THG-Emissionen im prognostizierten Energiemix des Beispielgebäudes (eigene Darstellung)

Für die Berechnung werden zwei Reduktionspfade neben die vorliegenden Daten gelegt und zeigen eine Reduktion bis zum politisch avisierten Jahr 2045 für eine emissionsneutrale Energieversorgung und ein berechnetes Jahr, in dem nach aktuellen Maßnahmen bei linearer Reduktion die Energiebereitstellung ein Netto-Emissions-Null erreicht. Dabei kommt es vorübergehend zu einem kleinen Anstieg, der aus der Weiterführung der Datensätze zum deutschen Strommix vergangener Jahre hervorgeht. Die folgende Grafik beschreibt den Vergleich, wenn das eingegebene Baujahr nicht dem Gültigkeitsjahr der verwendeten Daten und EPDs entspricht und prognostiziert zukünftige Emissionswerte. Eine Minderung von 69,9 % ist bei der angenommenen emissionsneutralen Energiebereitstellung 2065 möglich. Bis 2045 sind unter dem angenommenen Baujahr 2030 89,0 % realisierbar.

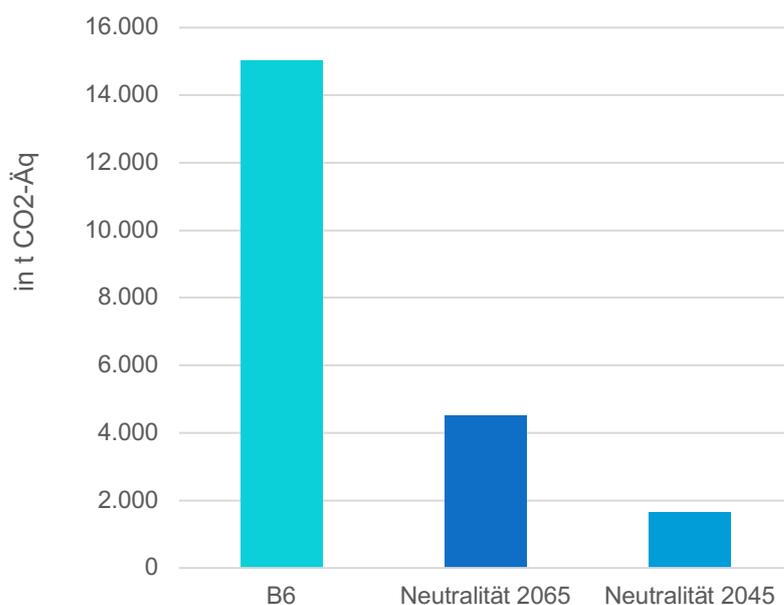


Abbildung 28 Emissionen der Phase B6 des Beispielgebäudes unter verschiedenen Reduktionsfaktoren (eigene Darstellung)

Die Reduktionspfade lassen sich für die Phase B6 direkt anwenden, da diese Emissionen zu 100 % energiebedingt sind. Bei der Eingabe liegt ein statischer Wert vor und es ist keine Information über den Zeitpunkt der Emission gegeben, weshalb im Tabellenblatt zum deutschen Strommix der eingegebene Betrachtungszeitraum aufgespannt wird, welcher üblicherweise 50 Jahre beträgt, durch Voreinstellungen aber anpassbar ist. Über diesen Zeitraum werden die Nutzungsemissionen aus Phase B6 gemäß dem Reduktionsfaktor errechnet, der mit einem Zieljahr der Neutralität versehen ist. Nach 2022 erfolgt die berechnete Emissionsreduktion. Zuvor werden Daten des Umweltbundesamtes genutzt. Der Zeitraum darf bis 2100 geführt werden, dementsprechend ist ein hypothetisches Baujahr nach 2050 bei einem Betrachtungsrahmen von 50 Jahren nicht möglich.

Aus den Eingaben berechnen sich für die Beispielschule folgende Ergebnisse. Die Berechnung erfolgt nach der sicheren aber pessimistischen Variante, ohne weitere Reduktion der Kategorie „Andere Ressourcen“, welche bei maximaler Reduktion der berechneten Kategorien etwa 40 % der verbleibenden THG-Emissionen verursacht. Das Tool setzt die energiebedingten Emissionen im angegebenen Baujahr an und verteilt die jährlichen Emissionen aus Phase B6 über die Folgejahre. Emissionen aus Phase C werden vereinfacht mit der Erstellung in Phase A positioniert, da eine zeitliche Zuordnung der auszutauschenden oder instandzuhaltenden Materialien nicht gegeben ist. Auch dieser Ansatz stellt ein pessimistisches Szenario dar, das in der Realität weiteres Verbesserungspotential bietet, da

von einer Reduktion der energiebedingten Emissionen zu einem späteren Zeitpunkt ausgegangen wird.

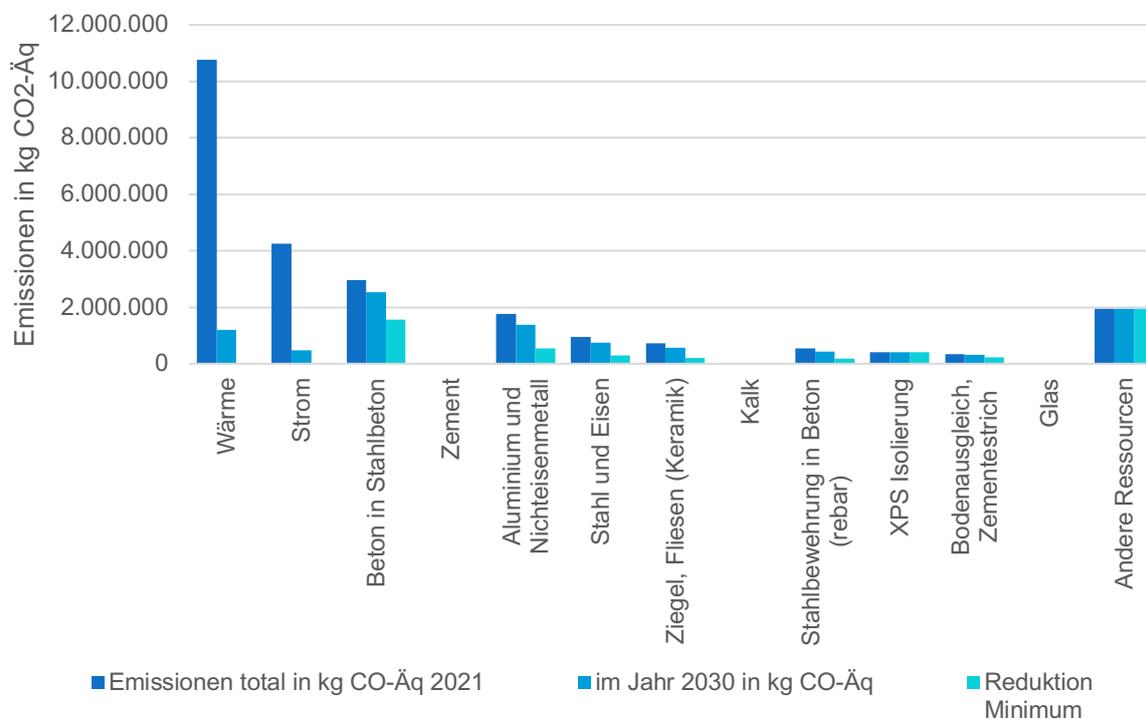


Abbildung 29 Emissionen der Beispielschule nach Ressourcentyp unter Reduktionsszenario in einem vorgegebenen Baujahr (eigene Darstellung)

Die Grafik zeigt, dass mit einem zukünftigen Baujahr die Emissionen aus Wärme- und Strombedarf, welche in der Bilanz einen Großteil der THG verursachen, durch eine emissionsarme Energieversorgung reduziert werden. Am Beispielgebäude wird unter gleichbleibendem Energiebedarf ein großes Reduktionspotential aufgezeigt. Ausgehend von 24.630 t CO₂-Äq. im Jahr 2021 auf 6.964 t CO₂-Äq. bei dem hypothetischen Baujahr 2030, unter einer Reduktion der energiebedingten Emissionen bis 2045, was einer Minderung um 59,5 % entspricht. Mit einer Verschiebung des Baujahrs in das Jahr 2045 ist eine Reduktion um 78,1 % auf das Minimum erreichbar und es würden 5.386 t CO₂-Äq. verbleiben.

Eine Gegenüberstellung von Sanierung und Neubau wird an den Gebäudeteilen B und D vereinfacht aufgezeigt. Ausgenommen der Nutzungsphase B6 weist der Abschnitt B 11,85 kg CO₂-Äq/m²*a auf, während für D 15,72 kg CO₂-Äq/m²*a berechnet wurden. Diese 33 % können durch eine schlechtere Qualität der Gebäudehülle im Sanierungsteil durch erhöhte Nutzungsemissionen ausgeglichen werden, wenn von einer einheitlichen Budgetgrenze in Neubau und Sanierung ausgegangen wird. Obwohl der Gebäudeteil A neben

der Sanierung um einen großen Anbau ergänzt wird, schneidet er mit 10,72 kg CO₂-Äq/m²a deutlich besser ab als D. Gebäudeteil C sorgt mit 10,17 kg CO₂-Äq/m²a für die geringsten Emissionen pro Nutzfläche. Der Abstand zu D kann sich aus dem Unterschied der Gebäudehülle ergeben, an die in Bauteil D höheren Anforderungen gestellt wurden.

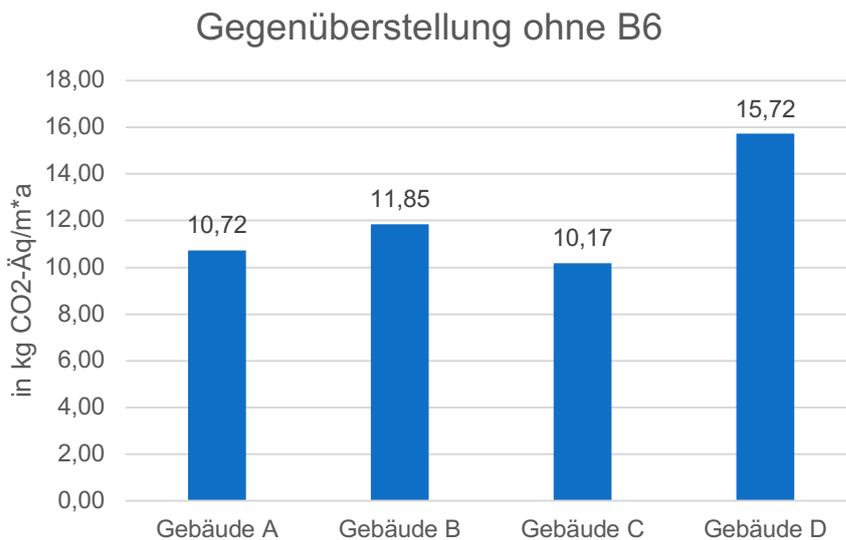


Abbildung 30 Emissionen der Beispielschule nach Gebäudeteil ohne Phase B6 (eigene Darstellung)

5.4 Fazit für die Gebäudezertifizierung

Gegenüber dem durchschnittlichen Wert zur Erstellung eines Gebäudes aus der Studie der DGNB von 8,7 kg CO₂-Äq/m²a fällt die Sanierung der Goetheschule mit Emissionen aus Phase A von 10,83 kg CO₂-Äq/m²a schlechter aus. Werden nur die üblicherweise bei einer Zertifizierung nach DGNB-Vorgaben relevanten Phasen A1-A3, die Rohstoffbeschaffung, der Transport und die Produktion angerechnet, ergibt sich für das Beispielgebäude ein Wert von 9,85 kg CO₂-Äq/m²a. Dieser liegt näher am Referenzwert der Studie, während sich hier weiteres Optimierungspotential durch beispielsweise alternative Bauteilaufbauten und Materialien erahnen lässt. Die Reduktion im Baujahr 2030 beträgt mit 8,51 kg CO₂-Äq/m²a eine Optimierung um 13,6 % und lässt sich über eine Verschiebung ins Jahr 2045 um 44 % auf 5,52 kg CO₂-Äq/m²a senken. Dieser verbleibende Wert beschreibt die prozessbedingten Emissionen bei vorliegender Bauweise und bietet ohne den Einsatz alternativer Herstellungsprozesse oder anderer Materialien keine Optimierung über emissionsneutrale Energie. Zu berücksichtigen ist der noch vorhandene Anteil an nicht bestimmten Materialien

der Kategorie „andere Ressourcen“ und deren beinhaltete THG-Emissionen. Eine Reduktion der Emissionen (Phasen A1-3) bei gleicher Bauweise in der Größenordnung von 44 % lässt sich aus dem Beispielprojekt ableiten, während die Gesamtbilanz um 78 % zu verbessern wäre. Die grauen Emissionen der Baustoffe werden in Zukunft an Relevanz gewinnen, da energiebedingte Emissionen weiter abnehmen. Alternative Bauteilaufbauten und emissionsarme Materialien werden in den Fokus der Betrachtung gerückt, um zukunftsgerechte Architektur zu schaffen und auch in Neubauten die Grenzwerte einhalten zu können.

Die DGNB veröffentlicht in regelmäßigen Abständen neue Kriterienkataloge, die für eine Gebäudezertifizierung herangezogen werden. Darin werden einzelne Kriterien und Aspekte überarbeitet, um auf aktuelle Anforderungen, Entwicklungen und Erkenntnisse zu reagieren. Für den betrachteten Aspekt der Ökobilanzierung mit dem GWP-Budget wird daher für eine stetige Reduktion des Budgets plädiert. Die Berechnungen belegen, dass die Einhaltung eines konstanten Wertes nicht mit den geforderten Klimazielen übereinstimmt. Diese Bedingung erfordert eine zeitliche Begrenzung des jeweils gültigen Wertes oder die Bereitstellung von Reduktionspfaden, welche zeitgleich zum Bauvorhaben die aktuellen Budgetwerte definieren. Für eine flächendeckende Optimierung der Bauemissionen reicht jedoch nicht nur die Koppelung von Reduktionszielen an Förderungen oder Zertifizierungen aus. Es bedarf einer rechtlich bindenden Vorgabe, wie beispielsweise der Integration einer LCA in den Bauantrag nach norwegischem Vorbild (Buro Happold, 2022). Damit würde nach dem Ansatz des Top-Down-Verfahrens sichergestellt, dass die definierten Grenzen für die gewählte Branche eingehalten werden und eine stetige Überwachung der Tendenzen als Kontrollfunktion verfügbar bleibt.

5.5 Gegenüberstellung von THG-Budget und THG-Bedarf

Der Abgleich zeigt eine Überschreitung des berechneten Budgets. An dieser Stelle ist anzumerken, dass variierende Anforderungen nach Gebäudetypologien und Nutzung zu unterschiedlichen Bedarfen und Emissionswerten führen. Das errechnete Beispiel einer Schule ist nicht als absoluter Mittelwert geeignet. Das Budget von 4,65 kg CO₂-Äq./m²*a wird mit einem Bedarf von 8,51 kg CO₂-Äq./m²*a fast um seinen doppelten Wert überschritten. Demzufolge sind die zuvor angenommenen Szenarien unter Einhaltung der Pariser Klimaziele nicht möglich. Ein Bauen nach Vorgabe der Sanierung der Goetheschule

ist unter der ökologischen Tragfähigkeit der Erde nicht nachhaltig möglich. Das Beispiel zeigt auf, dass in Zukunft andere Methoden und technische Fortschritte notwendig sind, um die Baubranche auf einen erforderlichen Pfad zu lenken und einer schnellen Klimaerwärmung entgegenzuwirken. Bei einer Voreinstellung des Zielpfades „2 °C Erwärmung unter 67 % Wahrscheinlichkeit“ verbliebe ein Restbudget und das Szenario wäre als erreichbar bestätigt.

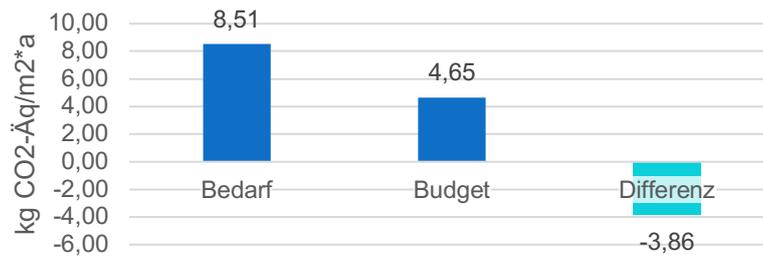


Abbildung 31 Gegenüberstellung von THG-Budget und Bedarf am Beispielobjekt (eigene Darstellung)

Das Beispiel zeigt in Bezug auf vorhandene Bausubstanz, dass durch die Nutzung des Bestands bereits große Mengen an CO₂ einzusparen sind. 643 t CO₂-Äq. werden allein durch potenziell nicht erneut aufzuwendenden Beton eingespart. Im Bereich der Ziegel sind es 185 t CO₂-Äq., wie dem Anhang zu entnehmen ist. Diese Menge kommt der Sanierung zugute, da für den Anteil der wieder- und weiterverwendeten Materialien die Gewinnung und Erstellung (Phase A) mit keinen THG-Emissionen belastet wird.

6 Optimierungsmöglichkeiten

Da für die Primärkonstruktion ein Großteil der grauen Energie aufgewandt wird, gibt es hier einen ähnlich großen Hebel für die Emissionsoptimierung. Meist verhält sich die Energie relativ zur Masse, weshalb eine Reduktion der Konstruktion auf ihre nötigen Erfordernisse zu verfolgen ist. Hier ergeben sich besondere Vorteile durch die Ansätze eines möglichst verdichteten Bauens, einer kompakten Bauweise, hoher konstruktiver Effizienz und reduzierten Erdbewegungen, wodurch bereits bis zu 50% der grauen Energie gegenüber vergleichbaren Bauweisen eingespart wird (Zeumer et al., 2009, S. 54).

Besonders die Geschoßdecken stehen in der Studie der DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2021a, S. 7) heraus. Mit durchschnittlich $2,7 \text{ kg} \cdot \text{CO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2 \text{NRF} \cdot \text{a})$ liegen sie deutlich vor Außenwänden (1,64), Gründung (1,43) und Innwänden (1,08).

Sofern die gestellten Anforderungen erfüllbar sind, sollten leichte Bauweisen in der Konstruktion bevorzugt werden. In der Fassade sorgen besonders transparente Bauteile für graue Energieaufwände. In der Herstellung von Glas fallen nur 16 % auf prozessbedingte Emissionen zurück (Leisin, 2020, S. 8). Auch sorgt die Ausbildung vieler, komplexer Details und Anschlusspunkte oft für gesteigerte Emissionen, weshalb eine Vereinfachung mit optimierten Materialstärken anzustreben ist (Zeumer et al., 2009, S. 54). Dieses Prinzip geht mit einer einfachen Gebäudeform einher, da reduzierte Baukörper weniger Sonderlösungen für Anschlusspunkte erfordern. Bei Dämmmaterialien kann die energetische Aufwendung der Einsparung im Wärmeverbrauch gegenübergestellt werden. Daraus ist die Amortisationszeit zu ermitteln, um ein Optimum in der Gesamtbilanz zu erreichen. Generell sorgt eine hohe Dauerhaftigkeit der Materialien für einen reduzierten Energiebedarf bei Austausch und Erneuerung. Es kann sich energetisch rentieren, für die Maximierung der Zeiten von Erneuerungszyklen in hochwertige Oberflächen zu investieren. Wenn in Zukunft ausreichend nachhaltige Energie zur Verfügung steht, ist die Berechnung anzustellen, ob ein großer Mehraufwand der grauen Energie in der Bauphase über den gesamten Lebenszyklus lohnend ist. Außerdem sind die Ressourcenverfügbarkeit und das Recycling in dieser Berechnung nicht zu vernachlässigen.

7 Diskussion und Ausblick

7.1 Diskussion

Auch wenn unter Bürogebäuden häufig junge Bauten abgerissen oder komplett saniert werden, verfügen Wohngebäude meist über eine Lebensdauer von deutlich mehr als 50 Jahren, was durch die Standardwerte der Lebensdauerbemessung deutlich wird (von Hebel et al., 2011). Auf eine Diversifikation von Gebäudekategorien mit ihren speziellen Eigenschaften wird verzichtet, um einen einzigen, konkreten Wert zu liefern. Unterschiedliche Anforderungen an Statik, Brandschutz oder sonstige technische Ausstattungen werden in einzelnen Gebäudetypen höhere Emissionen verursachen, als sie in einfachen Bauweisen auftreten. Für eine rechtliche Bindung müssen Ausnahmeregelungen und Verteilerschlüssel aufgesetzt werden.

Datenqualität

Der Startpunkt der Berechnung ist das Jahr 2020. Nicht verfügbare Daten wurden aus früheren Zeitpunkten herangezogen. Mögliche Änderungen, auch nach dem Berechnungspunkt 2020, sind im Tool teilweise berücksichtigt. Bei der Auswahl der Datenquellen wurde auf offizielle und staatliche oder anerkannte Herkunft geachtet. Jedoch lässt sich nicht jede Angabe bis zu ihrer ursprünglichen Quelle zurückverfolgen und verifizieren. Diese Unsicherheit bezüglich der Datenqualität muss bei der Nutzung des Tools anerkannt werden und es ist ein Augenmerk auf die Nachvollziehbarkeit der einzelnen Schritte zu legen. Bei Abweichungen der getesteten Szenarien können fehlerhafte Ergebnisse resultieren.

Da über die Ökobaudat, welche für die Bilanzierung des Beispielobjekts verwendet wird, unzureichend Datensätze zu energie- und prozessbedingten Emissionen verfügbar sind, werden die hinterlegten Emissionsdaten durch externe Datensätze ergänzt. Die Internationale Energieagentur (IEA) (2024) überwacht einige Industriesektoren hinsichtlich ihrer Emissionsentwicklung und liefert Daten zu Optimierungspotentialen. Auskünfte zu Datensätzen der Datenbank Ecoinvent aus der Schweiz wurden für die Berechnung nicht erteilt.

Kritik an der Sektorenteilung des KSG

Die Zuordnung von Zielen für die KSG-Sektoren umfasst nicht alle Emissionen und verschleiert teilweise die Bedeutung von Emissionen aus Gebäuden. Sie beziehen sich nur teilweise auf Betrieb und Nutzung. Die Gebäudeerstellung und der Rückbau sind nicht in den Sektor integriert, sondern auf Industrie, Energiewirtschaft und weitere Sektoren verteilt. Damit werden die Konsequenzen aus einer Gebäudeerstellung nur bedingt nachvollziehbar. Die Emissionen am oder im Gebäude bedeuten auch, dass bei der Verbrennung von Biogasen diese wie Erdgas negativ zur Last in der Bilanz fallen, obwohl sie aus regenerativen Quellen stammen. Eine Verlagerung der CO₂-Emissionen in andere Sektoren soll verhindert werden. Unter der Annahme, dass die Energiewirtschaft vollständig CO₂-neutral umgestaltet wird, könnte der Energieverbrauch im Gebäudesektor überhandnehmen. Vereinfacht sollte die Bedingung sein, nicht mehr Energie zu verbrauchen, als der aktuelle Neubaustandard vorgibt. Mit der Optimierung des Energiebedarfs von Gebäuden wird auch die Realisierung einer Reduktion der Emissionen des Energiesektors gesichert. Eine Neuerung des KSG soll Übersicht und Vereinfachung der Zielwerte schaffen (Deutscher Bundestag, 2024).

Kritik an der Methode

Die Methode teilt anfangs ein nationales Budget zu und unterteilt dann die Budgetsegmente nach vergangenen Anteilen. Weltweit sind Unterschiede in den Anforderungen an Dämmung, Heiz- und Kühlbedarf zu berücksichtigen. Ein Gebäude in gemäßigten Klimazonen hätte entsprechend wenig Nutzungsenergiebedarf gegenüber einem Bauwerk in besonders warmen oder kalten Gebieten, um thermischen Komfort im Innenraum zu gewährleisten. Zukünftig kann ein Anstieg der mittleren Temperaturen durch die Klimaerwärmung in kalten Zonen den Heizbedarf reduzieren, was über längere Zeiträume in der LCA nicht berücksichtigt wird, während in warmen Zonen ein gesteigerter Kühlbedarf auftreten würde.

Durch erneute Berechnungen mit aktuellen Parametern ergeben sich stetig abweichende Ergebnisse. Eine endgültige Berechnung sollte einen Startzeitpunkt festlegen, ab welchem die Budgets final zugeteilt werden. Hier wurde der Jahresbeginn 2024 gewählt. Länder, die anschließend hohe Emissionen aufweisen, müssen folglich schneller klimaneutral werden als Länder mit bereits reduzierten Emissionen. Möglich wäre die Verabschiedung der Pariser Klimaziele 2016 als Startpunkt, worauf in dieser Arbeit verzichtet wird. Begründet wird diese Wahl damit, dass aktuelle Budgets hinterfragt werden und vorab eine Überprüfung stattfand, ob für Bauten in Deutschland überhaupt noch ein Restbudget vorliegt. Ähnlich verhält es sich mit der Bevölkerungsentwicklung. Wenn die Bevölkerung in einem Land steigt, würde

demnach das verbleibende Restbudget neu nach Einwohnerzahlen verteilt, was zu einer Verzerrung der Budgetwerte führt.

Die Aufteilung in prozess- und energiebedingte Emissionen je Materialkategorie und Lebenszyklusphase ist mit den verfügbaren Daten nicht möglich. Deshalb werden weiterhin auch in späteren Phasen anfallende energiebedingte Emissionen bereits zum Zeitpunkt der Baurealisierung angerechnet, diese können geringer ausfallen. Die Berechnung wird auf der konservativ-pessimistischen Seite geführt, um keine überzogenen Budgetwerte zu liefern.

7.2 Fazit und Ausblick

Die Zuordnung grauer Emissionen zu Sektoren kann durch die Allokation in verschiedenen Branchen irreführend sein. So werden beispielsweise graue Emissionen in der Herstellung von Glasscheiben entweder der produzierenden Industrie oder dem Gebäude zugerechnet, wodurch sich die Entscheidungsträger für den Herstellungsprozess nicht in der Branche der Anrechnung befinden. Außerdem fallen Emissionen teilweise während des Betriebs oder am Ende der Lebensspanne eines Gebäudes an, was eine pauschale, einmalige Anrechnung verhindern sollte (Lise Hvid Horup et al., 2022, S. 10). Es wird eine breitere Menge an Daten benötigt, um detailliertere Berechnungen anzustellen und die Budgets mit verfeinerten Kriterien zu verteilen (Lise Hvid Horup et al., 2022, S. 8). Umfangreichere Datenerhebungen und deren bessere Zugänglichkeit sind in Deutschland zu etablieren. Die Aktualität der vorhandenen Daten würde durch eine zentrale Datenbank verbessert werden und Ungenauigkeiten durch den Rückgriff auf veraltete Daten wären überbrückt (Haberkorn, 2023). Eine aktuelle Überarbeitung des Klimaschutzgesetzes soll übergreifende Ziele nutzen, um Verschiebungen innerhalb von Sektoren zu vereinfachen und ähnlich dem Top-Down-Verfahren die übergeordneten Ziele im Fokus zu behalten (Deutscher Bundestag, 2024).

Es bedarf einer globalen Zusammenarbeit, um die gemeinsamen Ziele zu erreichen. Die grenzübergreifende Anerkennung einer Methode zur Berechnung mit Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen soll über die Öffentlichkeit kommuniziert und weltweit vereinheitlicht werden (Lise Hvid Horup et al., 2022, S. 8). Damit könnten sich neue Erkenntnisse und Technologien schneller in der Bauwirtschaft etablieren.

Zusammenfassend sollten Gebäude gesamtheitlich betrachtet werden und eine Zertifizierung fördern, dass in Summe weniger und dafür effizientere Gebäude gebaut werden, während der vorhandene Bestand effektiv innerhalb des verfügbaren Budgets saniert und betrieben wird.

Die errechneten Budgetwerte beziehen sich auf den Gebäudesektor und gehen von einer einheitlichen sektorenübergreifenden Reduktion aus. Verschiebungen aufgrund eines höheren Wohlstandsfaktors sollten vermieden werden, während jeder Sektor dazu angehalten ist, seine Ziele zu unterschreiten. Ausgehend vom persönlichen Verhalten trägt jeder Schritt in Richtung der angestrebten Emissionsneutralität dazu bei, den menschlichen Lebensraum auf der Erde für zukünftige Generationen zu sichern. Besonders die überverhältnismäßige Belastung der Umwelt in den vergangenen Jahrzehnten gilt es nun schnellstmöglich auszugleichen.

Literaturverzeichnis

- Aguiar, A. P. D., Vieira, I. C. G., Assis, T. O., Dalla-Nora, E. L., Toledo, P. M., Oliveira Santos-Junior, R. A., Batistella, M., Coelho, A. S., Savaget, E. K., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C. A., & Ometto, J. P. H. (2016). Land use change emission scenarios: anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, 22(5), 1821-1840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.13134>
- Becker, S., Hagen, J., Krüger, R., Ballaschk, S., Marcinek, H., & Stolte, C. (2022). *DENA-GEBÄUDEREPORT 2023. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*. Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.). https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena_Gebaedereport_2023.pdf
- Bouckaert, S., Pales, A. F., McGlade, C., Remme, U., Wanner, B., Varro, L., D'Ambrosio, D., & Spencer, T. (2021, 20.11.23). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA Publications. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
- Building Material Scout. (2022). *Grenzwerte und Vorgaben in Zertifizierungssystemen*. Abgerufen am 01.05.2024, von <https://building-material-scout.com/nachhaltiges-bauen/der-co2-wert-grenzwerte-und-vorgaben-in-zertifizierungssystemen/>
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. (2017, 16.11.23). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. BBSR. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. (2023). *Informationsblatt CO2-Faktoren*. Abgerufen am 03.03.2024, von https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.). (2020). *Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt*. BBSR-Online-Publikation 17/2020. Bonn.
- Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung. (2022). *Bevölkerungszahl und ihr Wachstum, Welt (1950-2020)*. Abgerufen am 14.05.24, von https://www.bib.bund.de/Permalink.html?cms_permaid=1217712
- Bundesministerium für Umwelt Naturschutz nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). (2023). *17 Nachhaltigkeitsziele – SDGs*. Abgerufen am 01.05.2024, von <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit/nachhaltigkeitsziele-sdgs>
- Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung. (2013). Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO2-Minderungspotenzialen. *BMVBS-Online-Publikation 7*.

- Abgerufen am 21.11.23, von https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/bmvbs-online/2013/DL_ON272013.pdf;jsessionid=4978A9D7746B7747914963C5E8A44B06.live11293?blob=publicationFile&v=1
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2017). *Abkommen von Paris*. BMWK. Abgerufen am 15.11.23, von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2018). *Abkommen von Paris*. Abgerufen am 30.03.2024, von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>
- Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen. (2023, 01.03.2023). *Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude. Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3*. Abgerufen am 07.02.2024, von https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-3211_LCA_Bilanzregeln-NW_v1-3.pdf
- Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen. (2024). *Über 1400 Datensätze für Bauprodukte - EN 15804 und BNB konform*. Abgerufen am 03.04.2024, von <https://www.oekobaudat.de/#:~:text=Derzeit%20wird%20die%20%C3%96KOBAUDAT%20in,gem%C3%A4%C3%9F%20EN%2015804%2BA2>
- Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen Pressereferat. (2024). *QNG - Allgemeine Anforderungen*. Abgerufen am 13.04.24, von <https://www.qng.info/qng/qng-anforderungen/#besondere-anforderungen>
- Bundesregierung. (2019). *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*. Abgerufen am 20.03.2024, von <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>
- Bundesregierung. (2022). *Was tut die Bundesregierung für den Klimaschutz?* Abgerufen am 09.04.2024, von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/bundesregierung-klimapolitik-1637146.pdf>
- Bundesregierung. (2023). *Die 17 globalen Nachhaltigkeitsziele verständlich erklärt*. Abgerufen am 10.04.2024, von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/nachhaltigkeitsziele-erklaert-232174>
- Bundesregierung. (2024). *CO2-Preis steigt auf 45 Euro pro Tonne*. Abgerufen am 09.02.2024, von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/co2-preis-kohle-abfallbrennstoffe-2061622#:~:text=Seit%20dem%201.,Bundesregierung%20darin%20eine%20vertretbare%20L%C3%B6sung>
- Buro Happold. (2022). *How Denmark leads the way in decarbonising the construction industry*. Abgerufen am 26.04.2024, von <https://www.burohappold.com/news/how-denmark-leads-the-way-in-decarbonising-the-construction-industry/>
- C3S Copernicus Earth Observation Programme. (2023). *How close are we to reaching a global warming of 1.5°C?* Abgerufen am 08.02.2024, von <https://climate.copernicus.eu/>
- Calliess, C. (2023). Vorsorgeprinzip, planetare Grenzen und Climate Engineering. In D. T. M. Prof. Dr. Wolfgang Köck, Dr. Moritz Reese (Ed.), *Zukunftsfähiges Umweltrecht I - Umweltrecht im Anthropozän - Das Vorsorgeprinzip vor neuen Herausforderungen* (pp. 99-142). <https://doi.org/10.5771/9783748941521-99>

- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2021a, 12.11.23). *Benchmarks für die Treibhausgasemission der Gebäudekonstruktion*. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. . Abgerufen am 12.11.2023, von https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2021b). *Kriterienkatalog Gebäude Sanierung (unveröffentlicht) (Version2)*.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2023a). *Kriterienkatalog Gebäude Neubau Version 2023, 2. Auflage*. DGNB. Stuttgart.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2023b). *Über das DGNB System*. Abgerufen am 01.02.2024, von <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/ueber-das-dgnb-system#:~:text=Mit%20einem%20Anteil%20von%20%C3%BCber,Anbietern%20von%20Zertifizierungssystemen%20in%20Deutschland.>
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (2021). *Benchmarks für die Treibhausgasemission der Gebäudekonstruktion* (L. E. Dr. Anna Braune, Kathrin Quante, Ed.). Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. . https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2021). DIN EN 15978-1:2021-09 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität; Deutsche und Englische Fassung prEN 15978-1:2021. <https://doi.org/10.31030/3251250>
- Deutscher Bundestag. (2024, 26.04.24). *Bundestag ändert das Bundes-Klimaschutzgesetz*. Abgerufen am 15.05.24, von <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2024/kw17-de-klimaschutzgesetz-999794>
- Draeger, D.-I. S. (2010). *Vergleich des Systems des Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen mit internationalen Systemen*. Zukunft Bau. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2009/VglGuetesiegel/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Europäisches Parlament. (2024, 12.03.2024). *Gebäudeenergieeffizienz: Parlament nimmt Pläne für CO₂-ärmere Gebäude an*. Abgerufen am 26.04.2024, von <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20240308IPR19003/gebaudeenergieeffizienz-parlament-nimmt-plane-fur-co2-armere-gebaude-an>
- European Commission - Directorate-General for Energy. (2024). *Energy Performance of Buildings Directive*. Abgerufen am 18.05.2024, von https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- Freitas, I. A. S., & Zhang, X. (2018). *Green building rating systems in Swedish market - A comparative analysis between LEED, BREEAM SE, GreenBuilding and Miljöbyggnad*. Elsevier Ltd. online.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijckx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R.,

- Anthoni, P., . . . Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth Syst. Sci. Data*, 15(12), 5301-5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Fuhrhop, D. (2020). *Verbietet das Bauen!* oekom. München.
- Gerten, D. (2020). Planetare Umweltgrenzen: naturwissenschaftliche Grundprinzipien. In M. Panschar, A. Slopinski, & F. Berding (Eds.), *Zukunftsmodell: Nachhaltiges Wirtschaften* (pp. 63-78). Karin Rebmann, WBV Media. <https://doi.org/10.3278/6004769w>
- Gervasio, H., Dimova, S., & Pinto, A. (2018). Benchmarking the Life-Cycle Environmental Performance of Buildings. *Sustainability*, 10, 1454. <https://doi.org/10.3390/su10051454>
- Global Carbon Project. (2023). *Global Carbon Atlas*. Abgerufen am 29.05.2024, von <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>
- Gymnasium Goetheschule Hannover. (2023). *Schulgeschichte*. Abgerufen am 03.04.2024, von <https://goetheschule.de/schulgeschichte/#:~:text=F%C3%BCr%20die%20junge%20Schule%20wurde,Adresse%20noch%20%E2%80%9ER%C3%BChmannstra%C3%9Fe%2014%E2%80%9C.>
- Haberkorn, J. (2023, 16.07.23). *Embodied Carbon Werte: Benchmark Studien Übersicht*. Abgerufen am 20.11.23, von <https://www.builtworld.com/magazine/article/embodied-carbon-werte-studien>
- Hauff, M. v., Schulz, R., & Wagner, R. (2018). *Deutschlands Nachhaltigkeitsstrategie*. UVK Verlagsgesellschaft mbH UVK/Lucius. Konstanz/München.
- Hornberg, C., Niekisch, M., Calliess, C., Kemfert, C., Lucht, W., Messari-Becker, L., & Rotter, V. S. (2019). Für die Umsetzung ambitionierter Klimapolitik und Klimaschutzmaßnahmen. offener Brief. Abgerufen am 18.11.23, von https://climate-week-bielefeld.de/wp-content/uploads/2019/09/2019_09_Brief_Klimakabinett.pdf
- Hörner, M., Cischinsky, D. H., Bischof, J., Schwarz, S., Behnisch, D. M., Meinel, D. G., Spars, P. D. G., & Busch, D. R. (2021). *Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude - Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland*. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). Darmstadt. https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/BMWi-03ET1315_ENOdataNWG_Schlussbericht_final.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press. Cambridge. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- International Organization for Standardization. (2022). *ISO 21931-1:2022 ICS: 91.040.01* (Vol. International Standard published [60.60]). Beuth-Verlag.
- Internationale Energieagentur (IEA). (2024). *Energy system / Industry*. Abgerufen am 11.04.2024, von <https://www.iea.org/energy-system/industry>
- Knopf, B., & Geden, O. (2022). *Ist Deutschland auf dem 1,5-Grad-Pfad? Eine Einordnung der Diskussion über ein nationales CO2-Budget*. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC). https://www.stiftung-mercator.de/content/uploads/2022/03/2022_MCC_Ist_Deutschland_auf_dem_1_5_Grad_Pfad.pdf

- Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI). (2023). *Energieintensive Industriebranchen*. Abgerufen am 20.05.2024, von <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/branchen/>
- Konzeptwerk Neue Ökonomie. (2022, 17.02.22). *CO2-Budgets und Klimaschulden*. Abgerufen am 21.11.23, von <https://konzeptwerk-neue-oekonomie.org/co2-budgets-und-klimaschulden>
- Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). (2024). *Maßstab für Energieeffizienz - Das Effizienzhaus beim Neubau*. Abgerufen am 07.02.2024, von <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-Effizienzhaus/>
- Latif, M., Semenov, V. A., & Park, W. (2015). Super El Niños in response to global warming in a climate model. *Climatic Change*, 132(4), 489-500. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1439-6>
- Leisin, M. (2020). *Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor*. IER Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung. Stuttgart. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Lise Hvid Horup, Jacob Steinmann, & Den, X. L. (2022). #3 Defining budget-based targets: A top-down approach. Ramboll. Brussels. <https://fs.hubspotusercontent00.net/hubfs/7520151/RMC/Content/EU-ECB-3-Defining-budget-based%20targets.pdf>
- Luderer, G., Kost, C., Sörgel, D., Günther, C., Benke, F., Auer, C., Koller, F., Herbst, A., Reder, K., Böttger, D., Ueckerdt, F., Pfluger, B., Wrede, D., Strefler, J., Merfort, A., Rauner, S., Siala, K., Schlichenmaier, S., Blesl, M., & Sacchi, R. (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045*. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>
- Lützkendorf, P. D.-I. h. T. (2023). *Gebäudebezogene Obergrenzen für Treibhausgas-emissionen als Ziel-, Planungs- und Nachweisgröße*. NBau - Nachhaltig Bauen. Abgerufen am 14.04.2024, von <https://www.nbau.org/2023/08/29/gebaeudebezogene-obergrenzen-fuer-treibhausgasemissionenals-ziel-planungs-und-nachweisgroesse/>
- Lützkendorf, T., König, H., Kohler, N., & Kreißig, J. (2009). *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung*. DETAIL-Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG. München.
- McDowell, N., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Brando, P., Brienen, R., Chambers, J., Christoffersen, B., Davies, S., Doughty, C., Duque, A., Espirito-Santo, F., Fisher, R., Fontes, C. G., Galbraith, D., Goodsman, D., Grossiord, C., Hartmann, H., Holm, J., Johnson, D. J., . . . Xu, X. (2018). Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist*, 219(3), 851-869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.15027>
- McMakler GmbH. (2021). *Energieeffizienz Gebäude: Schlechte Energiebilanz von Wohnhäusern*. Abgerufen am 12.04.2024, von <https://www.mcmakler.de/research/umfragen-trends/Energieeffizienz>
- One Click LCA Ltd. (2021). *Embodied carbon benchmark data for European buildings*. Abgerufen am 20.05.2024, von <https://143253260.fs1.hubspotusercontent-eu1.net/hubfs/143253260/Ebooks/Embodied-Carbon-Benchmarks-for-European-Buildings-10-June-2021-FINAL.pdf>

- One-Planet Alliance. (2023). *Footprint- und Biokapazitätsbuchhaltung – Eine Einführung*. Abgerufen am 18.05.2024, von <https://oneplanetalliance.org/de/footprint-und-biokapazitaet/#:~:text=Nach%20Sch%C3%A4tzungen%20des%20Global%20Footprint,Hektar%20pro%20Person%20%5B3%5D>.
- ppp architekten + stadtplaner gmbh. (2012). *Lageplan-Goetheschule*. <https://www.ppp-architekten.de/wp-content/uploads/2021/05/21-05-07-Lageplan-Goetheschule.jpg>
- ppp architekten + stadtplaner gmbh. (2021). *Goethe und die Musik*. Abgerufen am 06.04.2024, von <https://www.ppp-architekten.de/portfolio/erweiterung-goetheschule-hannover-2-ba/>
- Prater, T. (2023, 26.10.23). *Global use of fossil fuels, exajoules, 1965-2050*. Carbon Brief. Abgerufen am 24.11.23, von <https://www.carbonbrief.org/wp-content/uploads/2023/10/Climate-policy-is-bringing-world-closer-than-ever-before-to-a-peak-in-fossil-fuel-use.png>
- Prof Levermann, A., Prof. Stefan Rahmstorf, Prof Ricarda Winkelmann, Dr Jonathan Donges, Levke Caesar, Dr Boris Sakschewski, & Thonicke, D. K. (2019). *Kipppunkte im Klimasystem*. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Potsdam. <https://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Kipppunkte%20im%20Klimasystem%20-%20Update%202019.pdf>
- Rat der Europäischen Union und Europäischer Rat. (2024). „Fit für 55“. Abgerufen am 29.03.2024, von <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55/>
- Roth, C. (2011). *Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten. Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden bei ungewissem Lebensweg*. Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner. Darmstadt.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen. (2022). *Wie viel CO2 darf Deutschland maximal noch ausstoßen?* SRU. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_06_fragen_und_antworten_zum_co2_budget.pdf?__blob=publicationFile&v=30
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). (2024). *Wo stehen wir beim CO2-Budget? Eine Aktualisierung*. SRU. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2024_03_CO2_Budget.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Statistisches Bundesamt. (2023). Anzahl der Schüler:innen an allgemeinbildenden Schulen in Deutschland im Schuljahr 2022/2023 nach Schulart [Graph]. In *Statista*. Zugriff am 15. November 2023 <https://de-statista-com.eaccess.tum.edu/statistik/daten/studie/3377/umfrage/anzahl-der-schueler-nach-einzelnen-schularten/>.
- Statistisches Bundesamt. (2024). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen Bruttoinlandsprodukt (BIP)*. Abgerufen am 25.05.2024, von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/bip-bubbles.html>
- Tagesschau. (2024). *Erderwärmung erstmals durchschnittlich über 1,5 Grad*. Abgerufen am 08.02.2024, von <https://www.tagesschau.de/wissen/erderwaermung-copernicus-100.html>
- Thiele, L., Krohn, R., & Schmelzer, M. (2022). *Mit grüner Marktwirtschaft das Klima retten?* Konzeptwerk Neue Ökonomie. Leipzig.

- Umweltbundesamt. (2021, 15.03.2021). *Jährliche Treibhausgas-Emissionen in Deutschland / Annual greenhouse gas emissions in Germany*
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten>
- Umweltbundesamt. (2022). *Die Treibhausgase*. Abgerufen am 07.02.2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
- Umweltbundesamt. (2023a). *Endenergieverbrauch 2022*. Abgerufen am 1.03.2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energetragern>
- Umweltbundesamt. (2023b). *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022*. Umweltbundesamt. Abgerufen am 04.05.2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-treibhausgas-9>
- Umweltbundesamt. (2023c). *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen*. Abgerufen am 26.04.2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#klimakosten-von-treibhausgas-emissionen>
- Umweltbundesamt. (2023d). *Nationale Treibhausgasminderungsziele und deren Umsetzung*. Abgerufen am 20.05.2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#nationale-treibhausgasminderungsziele-und-deren-umsetzung>
- Umweltbundesamt. (2023e). *Struktur der Flächennutzung*. Abgerufen am 20.05.2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flaechennutzungen>
- Umweltbundesamt. (2024). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Abgerufen am 15.05.2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- United Nations Environment Programme. (2020a). *2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION: TOWARDS A ZERO-EMISSIONS, EFFICIENT AND RESILIENT BUILDINGS AND CONSTRUCTION SECTOR - EXECUTIVE SUMMARY*. Global Alliance for Buildings and Construction. Nairobi.
<https://doi.org/https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34572>
- United Nations Environment Programme. (2020b). *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector* (UNEP, Ed.). Global Alliance for Buildings and Construction. Nairobi. https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ). (2023). *Dekarbonisierung von Zement und Beton*. Abgerufen am 02.02.2024, von <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/klimaschutz/uebersicht#:~:text=Die%20Herstellung%20einer%20Tonne%20Zement,aktuell%20auf%20etwa%2020%20Mio.>
- von Hebel, E., Jahn, K., & Clausnitzer, K. (2011). *Der energetische Sanierungsbedarf und der Neubaubedarf von Gebäuden der kommunalen und sozialen Infrastruktur*. Bremer Energie Institut. Bremen. <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:109-opus-136919>

- Weidner, S., Mrzigod, A., Bechmann, R., & Sobek, W. (2021a-c). Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. *Beton- und Stahlbetonbau*, 116(12), 969-977.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/best.202100065>
- World Meteorological Organization. (2023, 14.09.2023). *Climate change undermines nearly all sustainable development goals*. WMO. Abgerufen am 18.11.23, von <https://public.wmo.int/en/media/press-release/climate-change-undermines-nearly-all-sustainable-development-goals>
- Zeumer, M., John, V., & Hartwig, J. (2009). Nachhaltiger Materialeinsatz - Graue Energie im Lebenszyklus. *DETAIL Green*, 1, 54-56. https://www.researchgate.net/profile/Viola-John/publication/267633096_Nachhaltiger_Materialeinsatz_-_Graue_Energie_im_Lebenszyklus/links/54555dec0cf51647dd47e/Nachhaltiger-Materialeinsatz-Graue-Energie-im-Lebenszyklus.pdf
- Zimmermann, J., & Reiser, M. (2021). Prognose des Verbrauchs grauer Energie über die Lebensdauer von Gebäuden. *Bautechnik*, 98(1), 63-73.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bate.202000068>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Methodik und Aufbau zur Beantwortung der Forschungsfrage (eigene Darstellung)	6
Abbildung 2 CO ₂ -Referenzwerte auf Basis der Werte einer OneClickLCA-Gebäudestudie (eigene Darstellung) (One Click LCA Ltd, 2021).....	10
Abbildung 3 DGNB Zertifizierungsstufen und Erfüllungsgrade (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023b)	13
Abbildung 4 Bewertungsrelevante Bilanzgrößen der Ökobilanz (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).....	19
Abbildung 5 Darstellung der Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15643: 2021-12 (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).....	19
Abbildung 6 Formel 1 und 2 zur Berechnung der LCA (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)	20
Abbildung 7 Formel 3 zur Summierung der erfassten Bilanzdaten (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).....	20
Abbildung 8 Formel 4 und 5 betreffen den Austausch und den jährlichen Endenergiebedarf (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).....	21
Abbildung 9 Formel 6 Ermittlung der Emissionen je Energieträger (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).....	22
Abbildung 10 Formel 7 Ermittlung der Emissionen von Abfallbehandlung und Entsorgung (Modul C3-C4) (Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)	22
Abbildung 11 Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland (Umweltbundesamt, 2023d)	26
Abbildung 12 Endenergieverbrauch Deutschland 2022 (Umweltbundesamt, 2023a).....	27
Abbildung 13 Die 17 Nachhaltigkeitsziele der Agenda 2030 (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), 2023)	29
Abbildung 14 Unsicherheitsbereiche der wichtigsten Kippelemente im Kontext der globalen Temperaturentwicklung seit dem Höhepunkt der letzten Eiszeit und für die Zukunft (verschiedene Emissionsszenarien; RCP2.6 wäre Paris-kompatibel, RCP 8.5 ist der Pfad ohne wirksame Klimapolitik). (Prof Levermann et al., 2019)	31
Abbildung 15 Methode zur Berechnung der Budgetwerte (eigene Darstellung)	36
Abbildung 16 CO ₂ -Budget Deutschland (Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2022) Datenquellen: (Knopf & Geden, 2022); (Konzeptwerk Neue Ökonomie, 2022)	38

Abbildung 17 Treibhausgasemissionen aus Errichtung und Nutzung von Hochbauten, eigene Darstellung nach Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.) (2020)	47
Abbildung 18 Prognose des Gebäudebestands in Deutschland auf Grundlage der Eingaben	49
Abbildung 19 Nutzungsemissionen Wärme und Kälte der Berechnungsvariante 1	50
Abbildung 20 Lageplan Goetheschule, verändert durch Autor nach ppp architekten + stadtplaner gmbh (2012)	52
Abbildung 21 Gebäudemodell zur Massenermittlung erstellt von M.Sc. Leander Präger, TUM.....	53
Abbildung 22 Emissionen nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung).....	54
Abbildung 23 THG-Emissionen nach Ressourcentyp (eigene Darstellung).....	55
Abbildung 24 Methode der dynamischen Emissionsprognose (eigene Darstellung)	56
Abbildung 25 Methode der dynamischen Ermittlung von Emissionen am Zeitstrahl (eigene Darstellung)	57
Abbildung 26 Historische Entwicklung der THG-Emissionen im deutschen Strommix auf Grundlage von Umweltbundesamt (2023b) mit fortgeführten Reduktionspfaden (eigene Darstellung und Prognose).....	58
Abbildung 27 Reduktionspfade der THG-Emissionen im prognostizierten Energiemix des Beispielgebäudes (eigene Darstellung).....	58
Abbildung 28 Emissionen der Phase B6 des Beispielgebäudes unter verschiedenen Reduktionsfaktoren (eigene Darstellung)	59
Abbildung 29 Emissionen der Beispielschule nach Ressourcentyp unter Reduktionsszenario in einem vorgegebenen Baujahr (eigene Darstellung)	60
Abbildung 30 Emissionen der Beispielschule nach Gebäudeteil ohne Phase B6 (eigene Darstellung)	61
Abbildung 31 Gegenüberstellung von THG-Budget und Bedarf am Beispielobjekt (eigene Darstellung)	63

Anhang

Lebenszyklusanalyse der Goetheschule

Angefertigt mit OneClickLCA von M.Sc. Leander Präger

Energieausweis der Goetheschule Hannover

Berechnungen und Report des Excel-Tools

Handbuch zur Bedienung des Tools

Lebenszyklusanalyse der Goetheschule, angefertigt mit OneClickLCA von M.Sc. Leander Präger; Gebäudeteil A

Life-Cycle Assessment for Level(s) in compliancy with EN 15804 +A2 [Download Results Summary](#)

Result category	Global Warming Potential total kg CO ₂ e	Global Warming Potential fossil kg CO ₂ e	Global Warming Potential biogenic kg CO ₂ e	Global Warming Potential, LULUC kg CO ₂ e	Depletion potential of the stratospheric ozone layer kg CFC11e	Acidification potential, Accumulated Exceedance mol H+ eq.	Eutrophication aquatic freshwater kg Pe	Eutrophication aquatic marine kg N eq.	Eutrophication terrestrial mol N eq.	Formation potential of tropospheric ozone kg NMVOC eq.	Abiotic depletion potential (ADP-elements) for non fossil resources (+A2) kg Sbe	Abiotic depletion potential (ADP-fossil fuels) for fossil resources (+A2) MJ	Water use m ³ deprived
A1-A3 Construction Materials	2,21E+06	2,21E+06	0,00E+00	1,98E+03	3,60E-08	4,72E+03	0,00E+00	1,24E+03	1,36E+04	3,74E+03	5,86E+01	2,19E+07	8,86E+04
A4 Transportation to site	7,76E+04	7,76E+04		2,48E+00	1,70E-02	1,19E+02	6,03E-01	1,43E+01	1,55E+02	6,53E+01	1,03E+02	1,24E+06	2,78E+00
A5 Construction/installation process	1,55E+05	1,54E+05	0,00E+00	1,78E+02	6,44E-04	3,61E+02	2,28E-02	9,64E+01	1,02E+03	2,77E+02	1,33E+01	1,67E+06	7,80E+03
B1 Use phase													
B2 Maintenance													
B3 Repair	0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B4-B5 Material replacement and refurbishment	1,63E+05	1,62E+05		9,30E+02	4,59E-04	5,35E+02	1,62E-02	2,22E+02	1,56E+03	3,64E+02	6,74E+01	3,05E+06	1,33E+04
B6 Energy consumption	5,21E+06	5,20E+06		8,73E+03	7,78E-08	6,72E+03	0,00E+00	2,35E+03	2,52E+04	6,04E+03	1,12E+00	6,32E+07	2,84E+05
B7 Water use													
C1-C4 End of life	2,13E+05	2,12E+05	0,00E+00	4,99E+02	3,84E-10	7,65E+02	0,00E+00	2,78E+02	3,13E+03	7,81E+02	3,89E-02	1,69E+06	2,76E+04
D External impacts (not included in totals)	-5,13E+05	-5,13E+05		-2,48E+02	8,73E-08	-1,58E+03	0,00E+00	-2,90E+02	-3,15E+03	-8,69E+02	-7,11E-02	-6,38E+06	-1,76E+04
Total	8,03E+06	8,02E+06	0,00E+00	1,23E+04	1,81E-02	1,32E+04	6,42E-01	4,20E+03	4,46E+04	1,13E+04	2,43E+02	9,27E+07	4,21E+05
Results per denominator													
Per gross internal floor area m ² / year	3,05E+01	3,05E+01	0,00E+00	4,68E-02	6,89E-08	5,02E-02	2,44E-06	1,60E-02	1,70E-01	4,28E-02	9,25E-04	3,52E+02	1,60E+00
Per gross internal floor area m ²	1,53E+03	1,52E+03	0,00E+00	2,34E+00	3,45E-06	2,51E+00	1,22E-04	7,99E-01	8,48E+00	2,14E+00	4,62E-02	1,76E+04	8,00E+01

LCA Checker overall grade: B

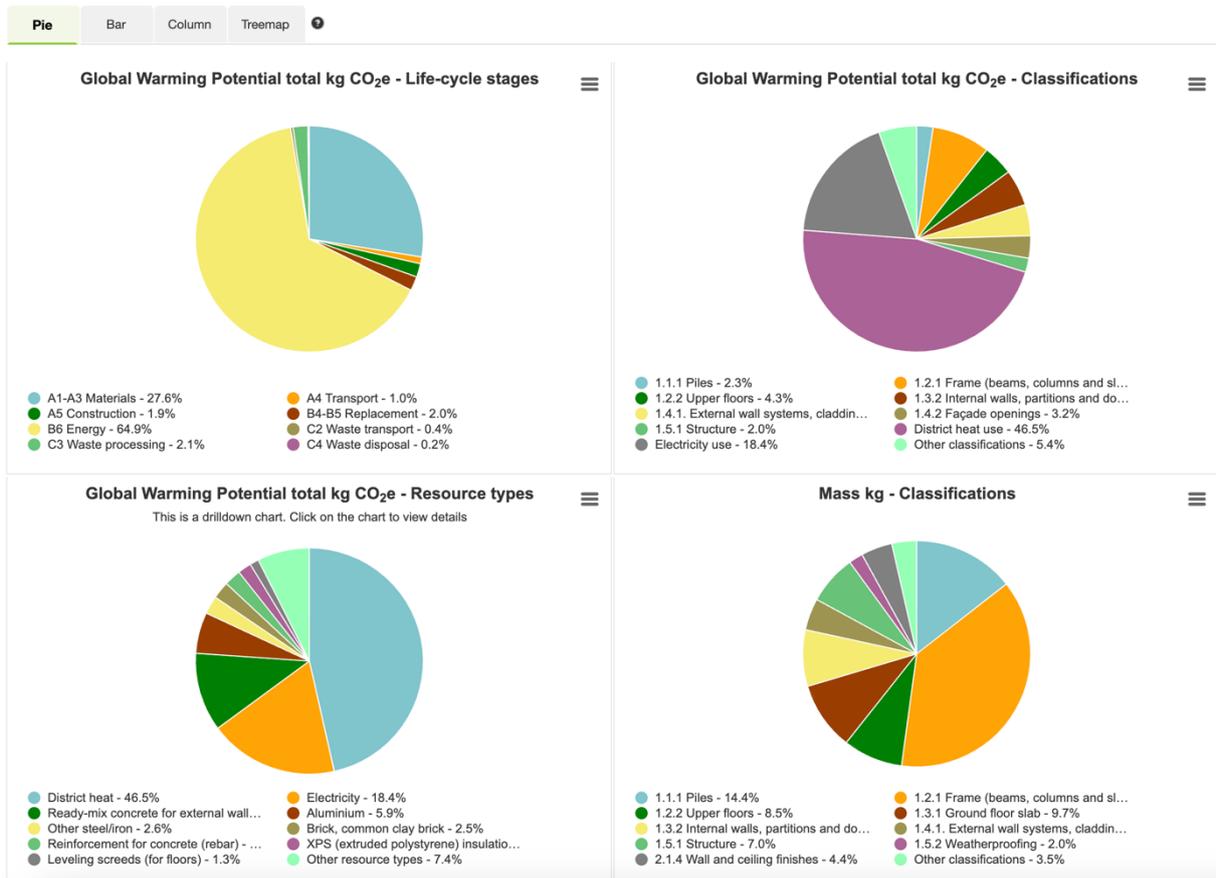
No.	Check description	Project value	Threshold value	Typical value	Unit	Type	Validated ?
1	Services mass credible: Has no materials	0.0	greater than 2		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
2	External areas mass credible: Has no materials	0.0	greater than 10		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
3	Brick mass credible: Brick mass is unusual	197.766	0.0 - 100		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
4	Gypsum board and plaster mass credible (no cement): Gypsum and plaster mass is unusually high	157.997	0.0 - 80		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
5	Gypsum board mass credible: Gypsum board mass is unusual	64.379	3 - 40		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
6	Vertical materials mass: Value seems unusual but is within allowable deviation range	758.522	50 - 700		kg/m ²	⚠	<input type="radio"/>
Validated checks							
7	Foundation mass credible	498.486	greater than 100		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
8	Structure mass credible	1508.043	greater than 150		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
9	Finishes mass credible	45.606	greater than 10		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
10	Ready mix and reinforcement ratio	3.483	1 - 7		%	✓	<input type="radio"/>
11	Too few materials to be credible	44	greater than 20		nr.	✓	<input type="radio"/>
12	Too dominant single material	32.843	less than 50		%	✓	<input type="radio"/>
13	Insulation mass credible	8.867	1 - 21		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
14	Glass and openings mass credible	6.215	2 - 25		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
15	Horizontal materials mass	749.522	100 - 1300		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
16	Mortar mass credible	9.609	0.4 - 50		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
17	Glass mass credible	6.215	1 - 13		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
18	Roofing bitumen mass credible	1.594	0.5 - 4		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>

▼ Most contributing materials (Global Warming Potential total)

Compare data

No.	Resource	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Of cradle to gate (A1-A3)	Sustainable alternatives
1.	Ready-mix concrete, C30/37, 2360.0 kg/m ³ , EN15804+A2	727 tonnes CO ₂ e	32.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
2.	Aluminum castings, 2700 kg/m ³ , EN15804+A2	390 tonnes CO ₂ e	17.6 %	Show sustainable alternatives Add to compare
3.	Reinforcement steel wire, EN15804+A2	178 tonnes CO ₂ e	8.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
4.	Steel sheet, 0.3-3.0mm, 7874.0 kg/m ³ , EN15804+A2	98 tonnes CO ₂ e	4.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
5.	Facing brick, 1800 kg/m ³ , EN15804+A2	95 tonnes CO ₂ e	4.3 %	Show sustainable alternatives Add to compare
6.	Steel forging part, 7850.0 kg/m ³ , EN15804+A2	89 tonnes CO ₂ e	4.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
7.	Sand-lime brick, 2000 kg/m ³ , EN15804+A2	80 tonnes CO ₂ e	3.6 %	Show sustainable alternatives Add to compare
8.	Cement screed, EN15804+A2	80 tonnes CO ₂ e	3.6 %	Show sustainable alternatives Add to compare
9.	Extruded polystyrene (XPS), 32 kg/m ³ , EN15804+A2	66 tonnes CO ₂ e	3.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
10.	Hot dip galvanized steel sheet, 7850 kg/m ³ , EN15804+A2	66 tonnes CO ₂ e	3.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
11.	Insulated glazing, triple glazing, 30 kg/m ² , EN15804+A2	58 tonnes CO ₂ e	2.6 %	Show sustainable alternatives Add to compare
12.	Aluminium sheet, 2700 kg/m ³ , EN15804+A2	49 tonnes CO ₂ e	2.2 %	Show sustainable alternatives Add to compare
13.	Gypsum fiber board, 25 mm, 24.07 kg/m ² , 960 kg/m ³ , EN15804+A2	32 tonnes CO ₂ e	1.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
14.	Linoleum, 3 kg/m ² , EN15804+A2	31 tonnes CO ₂ e	1.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
15.	Mineral wool for facade insulation, 46.25 kg/m ³ , EN15804+A2	23 tonnes CO ₂ e	1.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
16.	Gypsum interior plaster, 900 kg/m ³ , EN15804+A2	21 tonnes CO ₂ e	1.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
17.	Gypsum fibre board, 10 kg/m ² , 10mm, EN15804+A2	17 tonnes CO ₂ e	0.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
18.	HPL board, 1400 kg/m ³ , EN15804+A2	16 tonnes CO ₂ e	0.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
19.	Vegetation substrate, 1400kg/m ³ , EN15804+A2	13 tonnes CO ₂ e	0.6 %	Show sustainable alternatives Add to compare
20.	Precast concrete wall, 120 mm, 291.3 kg/m ² , 2427.5 kg/m ³ , EN15804+A2	11 tonnes CO ₂ e	0.5 %	Show sustainable alternatives Add to compare

Life-cycle overview of Global Warming Potential total



Cradle to grave (A1-A4, B4-B5, C1-C4)	kg CO ₂ e/m ²
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="background-color: #006633; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(< 350) A</div> <div style="background-color: #009933; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(350-420) B</div> <div style="background-color: #92d050; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(420-490) C</div> <div style="background-color: #ffff00; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(490-560) D</div> <div style="background-color: #f4a460; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(560-630) E</div> <div style="background-color: #e67e22; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(630-700) F</div> <div style="background-color: #e74c3c; color: white; padding: 5px;">(> 700) G</div> </div> <div style="margin-left: 20px; text-align: center;">  </div>	<div style="background-color: #92d050; color: white; padding: 10px; font-size: 24px; font-weight: bold;">454</div>

Gebäudeteil B

Life-Cycle Assessment for Level(s) in compliancy with EN 15804 +A2 [Download Results Summary](#)

Result category	Global Warming Potential total kg CO2e	Global Warming Potential fossil kg CO2e	Global Warming Potential biogenic kg CO2e	Global Warming Potential, LULUC kg CO2e	Depletion potential of the stratospheric ozone layer kg CFC11e	Acidification potential, Accumulated Exceedance mol H+ eq.	Eutrophication aquatic freshwater kg Pe	Eutrophication aquatic marine kg N eq.	Eutrophication terrestrial mol N eq.	Formation potential of tropospheric ozone kg NMVOC eq.	Abiotic depletion potential (ADP-elements) for non fossil resources (+A2) kg Sbe	Abiotic depletion potential (ADP-fossil fuels) for fossil resources (+A2) MJ	Water use m3 deprived
A1-A3 Construction Materials	1,61E+06	1,61E+06	0,00E+00	1,50E+03	2,82E-08	3,35E+03	0,00E+00	8,79E+02	9,78E+03	2,77E+03	4,89E+01	1,69E+07	6,34E+04
A4 Transportation to site	5,60E+04	5,60E+04		1,80E+00	1,24E-02	8,60E+01	4,37E-01	1,03E+01	1,12E+02	4,74E+01	9,14E+01	9,31E+05	2,02E+00
A5 Construction/Installation process	1,11E+05	1,11E+05	0,00E+00	1,20E+02	4,76E-04	2,48E+02	1,69E-02	6,61E+01	7,18E+02	1,97E+02	1,08E+01	1,23E+06	5,64E+03
B1 Use phase													
B2 Maintenance													
B3 Repair	0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B4-B5 Material replacement and refurbishment	1,52E+05	1,51E+05		4,99E+02	4,18E-04	4,06E+02	1,48E-02	1,43E+02	1,16E+03	2,93E+02	5,54E+01	3,07E+06	1,09E+04
B6 Energy consumption	3,54E+06	3,53E+06		5,93E+03	5,28E-08	4,56E+03	0,00E+00	1,60E+03	1,71E+04	4,10E+03	7,64E-01	4,29E+07	1,93E+05
B7 Water use													
C1-C4 End of life	1,87E+05	1,87E+05	0,00E+00	3,51E+02	2,75E-10	5,43E+02	0,00E+00	1,97E+02	2,23E+03	5,51E+02	2,72E-02	1,20E+06	2,25E+04
D External impacts (not included in totals)	-3,08E+05	-3,08E+05		-1,87E+02	5,13E-08	-9,12E+02	0,00E+00	-1,71E+02	-1,85E+03	-5,04E+02	-5,55E-02	-4,02E+06	-1,11E+04
Total	5,66E+06	5,65E+06	0,00E+00	8,40E+03	1,33E-02	9,19E+03	4,69E-01	2,89E+03	3,11E+04	7,96E+03	2,08E+02	6,63E+07	2,95E+05
Results per denominator													
Per gross internal floor area m2 / year	3,16E+01	3,16E+01	0,00E+00	4,70E-02	7,41E-08	5,14E-02	2,62E-06	1,62E-02	1,74E-01	4,45E-02	1,16E-03	3,71E+02	1,65E+00
Per gross internal floor area m2	1,58E+03	1,58E+03	0,00E+00	2,35E+00	3,71E-06	2,57E+00	1,31E-04	8,09E-01	8,69E+00	2,22E+00	5,80E-02	1,85E+04	8,26E+01

LCA Checker overall grade: B

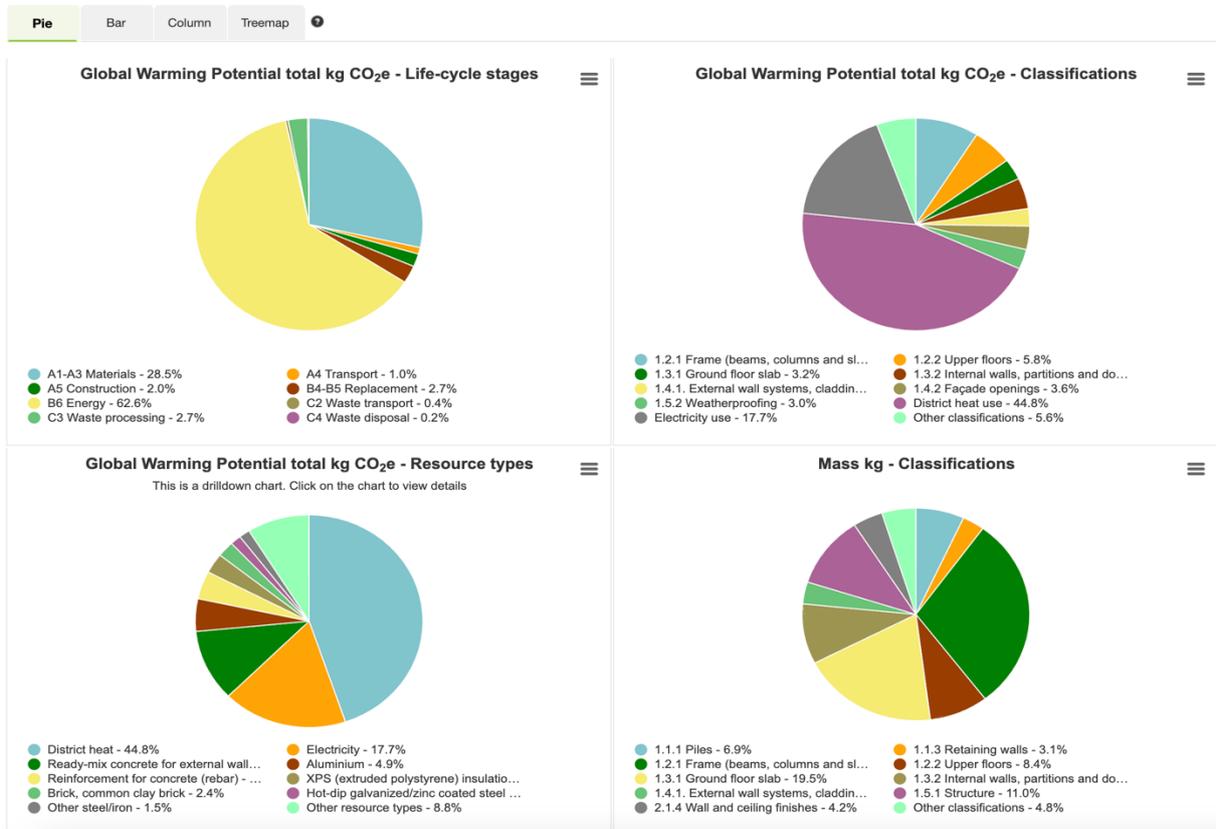
No.	Check description	Project value	Threshold value	Typical value	Unit	Type	Validated ?
1	Brick mass credible: Brick mass is unusual	209.736	0.0 - 100		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
2	Gypsum board and plaster mass credible (no cement): Gypsum and plaster mass is unusually high	166.503	0.0 - 80		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
3	External areas mass credible: Has no materials	0.0	greater than 10		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
4	Services mass credible: Has no materials	0.0	greater than 2		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
5	Gypsum board mass credible: Gypsum board mass is unusual	63.653	3 - 40		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
6	Vertical materials mass: Value seems unusual but is within allowable deviation range	724.487	50 - 700		kg/m ²	⚠	<input type="radio"/>
Validated checks							
7	Glass and openings mass credible	5.49	2 - 25		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
8	Too dominant single material	30.854	less than 50		%	✓	<input type="radio"/>
9	Ready mix and reinforcement ratio	6.374	1 - 7		%	✓	<input type="radio"/>
10	Finishes mass credible	42.8	greater than 10		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
11	Horizontal materials mass	705.554	100 - 1300		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
12	Mortar mass credible	6.665	0.4 - 50		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
13	Glass mass credible	5.49	1 - 13		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
14	Insulation mass credible	12.512	1 - 21		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
15	Too few materials to be credible	43	greater than 20		nr.	✓	<input type="radio"/>
16	Foundation mass credible	674.519	greater than 100		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
17	Roofing bitumen mass credible	2.855	0.5 - 4		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
18	Structure mass credible	1430.041	greater than 150		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>

▼ **Most contributing materials (Global Warming Potential total)**

[Compare data](#)

No.	Resource	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Of cradle to gate (A1-A3)	Sustainable alternatives
1.	Ready-mix concrete, C30/37, 2360.0 kg/m ³ , EN15804+A2	498 tonnes CO ₂ e	30.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
2.	Reinforcement steel wire, EN15804+A2	223 tonnes CO ₂ e	13.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
3.	Aluminum castings, 2700 kg/m ³ , EN15804+A2	188 tonnes CO ₂ e	11.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
4.	Hot dip galvanized steel sheet, 7850 kg/m ³ , EN15804+A2	81 tonnes CO ₂ e	5.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
5.	Extruded polystyrene (XPS), 32 kg/m ³ , EN15804+A2	73 tonnes CO ₂ e	4.5 %	Show sustainable alternatives Add to compare
6.	Aluminium sheet, 2700 kg/m ³ , EN15804+A2	72 tonnes CO ₂ e	4.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
7.	Sand-lime brick, 2000 kg/m ³ , EN15804+A2	66 tonnes CO ₂ e	4.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
8.	Cement screed, EN15804+A2	62 tonnes CO ₂ e	3.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
9.	Facing brick, 1800 kg/m ³ , EN15804+A2	54 tonnes CO ₂ e	3.3 %	Show sustainable alternatives Add to compare
10.	Steel forging part, 7850.0 kg/m ³ , EN15804+A2	44 tonnes CO ₂ e	2.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
11.	Steel sheet, 0.3-3.0mm, 7874.0 kg/m ³ , EN15804+A2	35 tonnes CO ₂ e	2.2 %	Show sustainable alternatives Add to compare
12.	Insulated glazing, triple glazing, 30 kg/m ² , EN15804+A2	35 tonnes CO ₂ e	2.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
13.	Gypsum fiber board, 25 mm, 24.07 kg/m ² , 960 kg/m ³ , EN15804+A2	17 tonnes CO ₂ e	1.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
14.	Mineral wool for facade insulation, 46.25 kg/m ³ , EN15804+A2	16 tonnes CO ₂ e	1.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
15.	Gypsum interior plaster, 900 kg/m ³ , EN15804+A2	15 tonnes CO ₂ e	0.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
16.	Linoleum, 3 kg/m ² , EN15804+A2	15 tonnes CO ₂ e	0.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
17.	HPL board, 1400 kg/m ³ , EN15804+A2	14 tonnes CO ₂ e	0.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
18.	Vegetation substrate, 1400kg/m ³ , EN15804+A2	13 tonnes CO ₂ e	0.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
19.	Gypsum fibre board, 10 kg/m ² , 10mm, EN15804+A2	12 tonnes CO ₂ e	0.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
20.	EPDM roof sheets, 2 kg/m ² , EN15804+A2	12 tonnes CO ₂ e	0.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare

Life-cycle overview of Global Warming Potential total



Cradle to grave (A1-A4, B4-B5, C1-C4)	kg CO ₂ e/m ²
(< 350) A	
(350-420) B	
(420-490) C	488
(490-560) D	
(560-630) E	
(630-700) F	
(> 700) G	



Gebäudeteil C

Life-Cycle Assessment for Level(s) in compliancy with EN 15804 +A2 [Download Results Summary](#)

Result category	Global Warming Potential total kg CO2e	Global Warming Potential fossil kg CO2e	Global Warming Potential biogenic kg CO2e	Global Warming Potential, LULUC kg CO2e	Depletion potential of the stratospheric ozone layer kg CFC11e	Acidification potential, Accumulated Exceedance mol H+ eq.	Eutrophication aquatic freshwater kg Pe	Eutrophication aquatic marine kg N eq.	Eutrophication terrestrial mol N eq.	Formation potential of tropospheric ozone kg NMVOC eq.	Abiotic depletion potential (ADP-elements) for non fossil resources (+A2) kg Sbe	Abiotic depletion potential (ADP-fossil fuels) for fossil resources (+A2) MJ	Water use m3 deprived
A1-A3 Construction Materials	4,13E+05	4,13E+05	0,00E+00	2,88E+02	6,43E-09	1,22E+03	0,00E+00	2,65E+02	2,93E+03	7,89E+02	6,89E+00	5,53E+06	1,99E+04
A4 Transportation to site	1,44E+04	1,44E+04		4,61E-01	3,17E-03	2,21E+01	1,12E-01	2,65E+00	2,88E+01	1,21E+01	1,96E+01	2,31E+05	5,17E-01
A5 Construction/installation process	3,30E+04	3,30E+04	0,00E+00	3,04E+01	5,60E-05	9,46E+01	1,98E-03	2,12E+01	2,27E+02	6,09E+01	1,99E+00	4,29E+05	2,03E+03
B1 Use phase													
B2 Maintenance													
B3 Repair	0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B4-B5 Material replacement and refurbishment	4,34E+04	4,33E+04		1,88E+02	1,03E-04	1,13E+02	3,65E-03	4,64E+01	3,38E+02	8,15E+01	9,97E+00	7,34E+05	3,44E+03
B6 Energy consumption	1,07E+06	1,07E+06		1,80E+03	1,60E-08	1,38E+03	0,00E+00	4,85E+02	5,19E+03	1,24E+03	2,32E-01	1,30E+07	5,85E+04
B7 Water use													
C1-C4 End of life	4,77E+04	4,76E+04	0,00E+00	1,05E+02	8,25E-11	1,63E+02	0,00E+00	5,94E+01	6,69E+02	1,67E+02	8,29E-03	3,57E+05	6,23E+03
D External impacts (not included in totals)	-2,00E+05	-2,00E+05		-7,40E+01	4,77E-08	-6,82E+02	0,00E+00	-1,13E+02	-1,23E+03	-3,38E+02	-2,17E-02	-2,66E+06	-1,06E+04
Total	1,63E+06	1,62E+06	0,00E+00	2,41E+03	3,33E-03	2,99E+03	1,18E-01	8,80E+02	9,39E+03	2,35E+03	3,87E+01	2,03E+07	9,01E+04
Results per denominator													
Per gross internal floor area m2 / year	3,00E+01	2,99E+01	0,00E+00	4,44E-02	6,13E-08	5,52E-02	2,17E-06	1,62E-02	1,73E-01	4,34E-02	7,13E-04	3,74E+02	1,66E+00
Per gross internal floor area m2	1,50E+03	1,50E+03	0,00E+00	2,22E+00	3,07E-06	2,76E+00	1,09E-04	8,11E-01	8,65E+00	2,17E+00	3,57E-02	1,87E+04	8,31E+01

LCA Checker overall grade: C

No.	Check description	Project value	Threshold value	Typical value	Unit	Type	Validated ?
1	Brick mass credible: Brick mass is unusual	441.274	0.0 - 100		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
2	Gypsum board and plaster mass credible (no cement): Gypsum and plaster mass is unusually high	161.267	0.0 - 80		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
3	External areas mass credible: Has no materials	0.0	greater than 10		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
4	Services mass credible: Has no materials	0.0	greater than 2		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
5	Ready mix and reinforcement ratio: Concrete reinforcement / ready mix concrete ratio is unusual	0.185	1 - 7		%	✗	<input type="radio"/>
6	Gypsum board mass credible: Gypsum board mass is unusual	58.71	3 - 40		kg/m ²	✗	<input type="radio"/>
7	Too dominant single material: Project has single too dominant input to be credible	57.144	less than 50		%	✗	<input type="radio"/>
8	Roofing bitumen mass credible: Value seems unusual but is within allowable deviation range	0.453	0.5 - 4		kg/m ²	⚠	<input type="radio"/>
9	Vertical materials mass: Value seems unusual but is within allowable deviation range	779.189	50 - 700		kg/m ²	⚠	<input type="radio"/>
Validated checks							
10	Glass and openings mass credible	7.558	2 - 25		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
11	Finishes mass credible	45.928	greater than 10		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
12	Horizontal materials mass	815.473	100 - 1300		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
13	Mortar mass credible	6.112	0.4 - 50		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
14	Glass mass credible	7.558	1 - 13		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
15	Insulation mass credible	9.294	1 - 21		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
16	Too few materials to be credible	36	greater than 20		nr.	✓	<input type="radio"/>
17	Foundation mass credible	404.752	greater than 100		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>
18	Structure mass credible	1594.661	greater than 150		kg/m ²	✓	<input type="radio"/>

▼ Most contributing materials (Global Warming Potential total)

Compare data

No.	Resource	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Of cradle to gate (A1-A3)	Sustainable alternatives
1.	Aluminum castings, 2700 kg/m3, EN15804+A2	236 tonnes CO ₂ e	57.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
2.	Facing brick, 1800 kg/m3, EN15804+A2	31 tonnes CO ₂ e	7.5 %	Show sustainable alternatives Add to compare
3.	Ready-mix concrete, C30/37, 2360.0 kg/m3, EN15804+A2	24 tonnes CO ₂ e	5.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
4.	Cement screed, EN15804+A2	19 tonnes CO ₂ e	4.6 %	Show sustainable alternatives Add to compare
5.	Insulated glazing, triple glazing, 30 kg/m2, EN15804+A2	16 tonnes CO ₂ e	3.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
6.	Extruded polystyrene (XPS), 32 kg/m3, EN15804+A2	14 tonnes CO ₂ e	3.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
7.	Steel sheet, 0.3-3.0mm, 7874.0 kg/m3, EN15804+A2	12 tonnes CO ₂ e	2.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
8.	Sand-lime brick, 2000 kg/m3, EN15804+A2	11 tonnes CO ₂ e	2.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
9.	Mineral wool for facade insulation, 46.25 kg/m3, EN15804+A2	7,2 tonnes CO ₂ e	1.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
10.	Linoleum, 3 kg/m2, EN15804+A2	6 tonnes CO ₂ e	1.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
11.	EPDM roof sheets, 2 kg/m2, EN15804+A2	5,3 tonnes CO ₂ e	1.3 %	Show sustainable alternatives Add to compare
12.	Gypsum interior plaster, 900 kg/m3, EN15804+A2	4,5 tonnes CO ₂ e	1.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
13.	HPL board, 1400 kg/m3, EN15804+A2	4,5 tonnes CO ₂ e	1.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
14.	Gypsum fiber board, 25 mm, 24.07 kg/m2, 960 kg/m3, EN15804+A2	3,4 tonnes CO ₂ e	0.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
15.	Aluminium sheet, 2700 kg/m3, EN15804+A2	3,1 tonnes CO ₂ e	0.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
16.	Gypsum fibre board, 10 kg/m2, 10mm, EN15804+A2	3 tonnes CO ₂ e	0.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
17.	Gypsum plaster board (impregnated), 12.5mm, 10 kg/m2, 800 kg/m3, EN15804+A2	2,1 tonnes CO ₂ e	0.5 %	Show sustainable alternatives Add to compare
18.	Reinforcement steel wire, EN15804+A2	1,7 tonnes CO ₂ e	0.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
19.	Application paint emulsion, interior, wear resistant, EN15804+A2	1,6 tonnes CO ₂ e	0.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
20.	Steel forging part, 7850.0 kg/m3, EN15804+A2	1,8 tonnes CO ₂ e	0.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare

Life-cycle overview of Global Warming Potential total



Cradle to grave (A1-A4, B4-B5, C1-C4)	kg CO ₂ e/m ²
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="background-color: #006633; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(< 350) A</div> <div style="background-color: #006633; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(350-420) B</div> <div style="background-color: #92d050; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(420-490) C</div> <div style="background-color: #ffff00; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(490-560) D</div> <div style="background-color: #f4a460; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(560-630) E</div> <div style="background-color: #e67e22; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">(630-700) F</div> <div style="background-color: #e74c3c; color: white; padding: 5px;">(> 700) G</div> </div> <div style="margin-left: 20px; text-align: center;">  </div>	<div style="background-color: #006633; color: white; padding: 10px; width: 100px; margin: 0 auto;">415</div>

Gebäudeteil D

Life-Cycle Assessment for Level(s) in compliancy with EN 15804 +A2 [Download Results Summary](#)

Result category	Global Warming Potential total kg CO2e ^①	Global Warming Potential fossil kg CO2e ^①	Global Warming Potential biogenic kg CO2e ^①	Global Warming Potential, LULUC kg CO2e ^①	Depletion potential of the stratospheric ozone layer kg CFC11e ^①	Acidification potential, Accumulated Exceedance mol H+ eq. ^①	Eutrophication aquatic freshwater kg Pe ^①	Eutrophication aquatic marine kg N eq. ^①	Eutrophication terrestrial mol N eq. ^①	Formation potential of tropospheric ozone kg NMVOC eq. ^①	Abiotic depletion potential (ADP-elements) for non fossil resources (+A2) kg Sbe ^①	Abiotic depletion potential (ADP-fossil fuels) for fossil resources (+A2) MJ ^①	Water use m3 deprived ^①
A1-A3 ^① Construction Materials	3,21E+06	3,21E+06	0,00E+00	2,48E+03	4,38E-08	6,88E+03	0,00E+00	1,69E+03	1,87E+04	5,36E+03	6,07E+01	3,42E+07	1,45E+05
A4 ^① Transportation to site	8,29E+04	8,29E+04		2,67E+00	1,83E-02	1,28E+02	6,48E-01	1,53E+01	1,67E+02	7,02E+01	1,44E+02	1,40E+06	2,99E+00
A5 ^① Construction/installation process	2,12E+05	2,12E+05	0,00E+00	1,88E+02	8,30E-04	4,99E+02	2,94E-02	1,23E+02	1,33E+03	3,69E+02	1,46E+01	2,35E+06	1,14E+04
B1 ^① Use phase													
B2 Maintenance													
B3 ^① Repair	0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B4-B5 ^① Material replacement and refurbishment	2,08E+05	2,08E+05		7,56E+02	4,93E-04	5,87E+02	1,74E-02	2,09E+02	1,63E+03	4,09E+02	7,02E+01	4,90E+06	1,33E+04
B6 ^① Energy consumption	5,19E+06	5,18E+06		8,69E+03	7,75E-08	6,69E+03	0,00E+00	2,34E+03	2,51E+04	6,01E+03	1,12E+00	6,29E+07	2,83E+05
B7 ^① Water use													
C1-C4 ^① End of life	4,05E+05	4,05E+05	0,00E+00	5,71E+02	4,57E-10	8,95E+02	0,00E+00	3,26E+02	3,72E+03	9,12E+02	4,56E-02	1,95E+06	4,37E+04
D ^① External impacts (not included in totals)	-8,76E+05	-8,76E+05		-4,19E+02	1,76E-07	-2,77E+03	0,00E+00	-4,87E+02	-5,29E+03	-1,45E+03	-1,20E-01	-1,15E+07	-3,69E+04
Total	9,31E+06	9,30E+06	0,00E+00	1,27E+04	1,96E-02	1,57E+04	6,95E-01	4,71E+03	5,06E+04	1,31E+04	2,91E+02	1,08E+08	4,97E+05
Results per denominator													
Per gross internal floor area m2 / year	3,55E+01	3,55E+01	0,00E+00	4,84E-02	7,49E-08	5,98E-02	2,65E-06	1,80E-02	1,93E-01	5,01E-02	1,11E-03	4,11E+02	1,89E+00
Per gross internal floor area m2	1,78E+03	1,77E+03	0,00E+00	2,42E+00	3,75E-06	2,99E+00	1,33E-04	8,98E-01	9,66E+00	2,51E+00	5,54E-02	2,05E+04	9,47E+01

LCA Checker overall grade: B

No.	Check description	Project value	Threshold value	Typical value	Unit	Type	Validated [?]
1	Brick mass credible: Brick mass is unusual	296.854	0.0 - 100		kg/m ²	✖	<input type="radio"/>
2	External areas mass credible: Has no materials	0.0	greater than 10		kg/m ²	✖	<input type="radio"/>
3	Services mass credible: Has no materials	0.0	greater than 2		kg/m ²	✖	<input type="radio"/>
4	Gypsum board and plaster mass credible (no cement): Gypsum and plaster mass is unusually high	138.691	0.0 - 80		kg/m ²	✖	<input type="radio"/>
5	Roofing bitumen mass credible: Roofing bitumen mass is unusual	4.91	0.5 - 4		kg/m ²	✖	<input type="radio"/>
Validated checks							
6	Glass and openings mass credible	6.14	2 - 25		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
7	Too dominant single material	31.059	less than 50		%	✔	<input type="radio"/>
8	Project mass credible	2462.289	300 - 3500		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
9	Ready mix and reinforcement ratio	3.435	1 - 7		%	✔	<input type="radio"/>
10	Finishes mass credible	64.213	greater than 10		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
11	Horizontal materials mass	691.196	100 - 1300		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
12	Gypsum board mass credible	27.06	3 - 40		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
13	Mortar mass credible	3.689	0.4 - 50		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
14	Glass mass credible	6.14	1 - 13		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
15	Embodied carbon credible	645.266	150 - 1000		kg CO ₂ e/m ²	✔	<input type="radio"/>
16	Insulation mass credible	18.519	1 - 21		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
17	Too few materials to be credible	45	greater than 20		nr.	✔	<input type="radio"/>
18	Foundation mass credible	910.385	greater than 100		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
19	Structure mass credible	1385.334	greater than 150		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>
20	Vertical materials mass	694.138	50 - 700		kg/m ²	✔	<input type="radio"/>

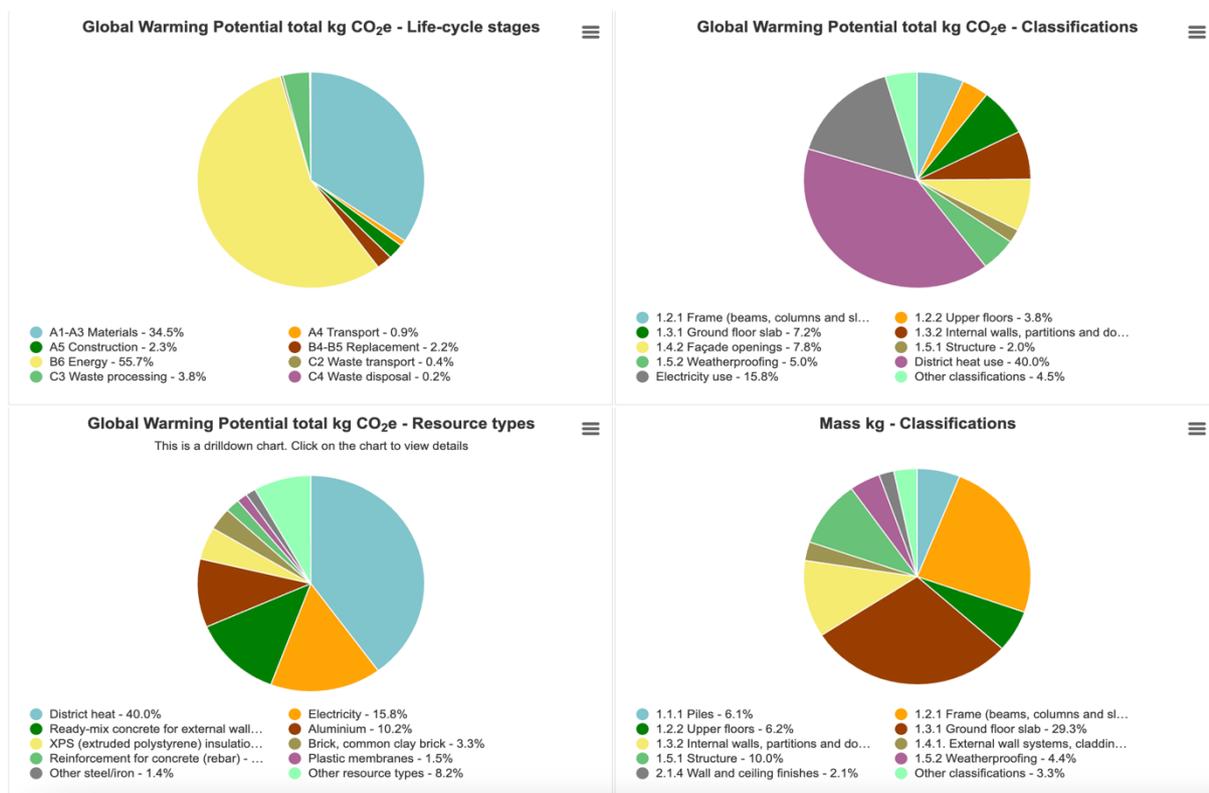
▼ Most contributing materials (Global Warming Potential total)

Compare data

No.	Resource	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Of cradle to gate (A1-A3)	Sustainable alternatives
1.	Ready-mix concrete, C30/37, 2360.0 kg/m ³ , EN15804+A2	998 tonnes CO ₂ e	31.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
2.	Aluminum castings, 2700 kg/m ³ , EN15804+A2	762 tonnes CO ₂ e	23.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
3.	Extruded polystyrene (XPS), 32 kg/m ³ , EN15804+A2	192 tonnes CO ₂ e	6.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
4.	Sand-lime brick, 2000 kg/m ³ , EN15804+A2	191 tonnes CO ₂ e	5.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
5.	Reinforcement steel wire, EN15804+A2	175 tonnes CO ₂ e	5.4 %	Show sustainable alternatives Add to compare
6.	Aluminium sheet, 2700 kg/m ³ , EN15804+A2	123 tonnes CO ₂ e	3.8 %	Show sustainable alternatives Add to compare
7.	Cement screed, EN15804+A2	102 tonnes CO ₂ e	3.2 %	Show sustainable alternatives Add to compare
8.	Steel sheet, 0.3-3.0mm, 7874.0 kg/m ³ , EN15804+A2	97 tonnes CO ₂ e	3.0 %	Show sustainable alternatives Add to compare
9.	Facing brick, 1800 kg/m ³ , EN15804+A2	88 tonnes CO ₂ e	2.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare
10.	Hot dip galvanized steel sheet, 7850 kg/m ³ , EN15804+A2	69 tonnes CO ₂ e	2.1 %	Show sustainable alternatives Add to compare
11.	Precast concrete wall, 120 mm, 291.3 kg/m ² , 2427.5 kg/m ³ , EN15804+A2	60 tonnes CO ₂ e	1.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
12.	Insulated glazing, triple glazing, 30 kg/m ² , EN15804+A2	56 tonnes CO ₂ e	1.7 %	Show sustainable alternatives Add to compare

Life-cycle overview of Global Warming Potential total

Pie Bar Column Treemap



Cradle to grave (A1-A4, B4-B5, C1-C4)	kg CO ₂ e/m ²
(< 350) A	
(350-420) B	
(420-490) C	
(490-560) D	
(560-630) E	
(630-700) F	645
(> 700) G	



Vergleich Auswertung Bestand Gebäudeteil A-D

Life-Cycle Assessment for Level(s) in compliancy with EN 15804 +A2 [Download Results Summary](#)

Result category	Global Warming Potential total kg CO2e ①	Global Warming Potential fossil kg CO2e ②	Global Warming Potential biogenic kg CO2e ③	Global Warming Potential, LULUC kg CO2e ④	Depletion potential of the stratospheric ozone layer kg CFC11e ⑤	Acidification potential, Accumulated Exceedance mol H+ eq. ⑥	Eutrophication aquatic freshwater kg Pe ⑦	Eutrophication aquatic marine kg N eq. ⑧	Eutrophication terrestrial mol N eq. ⑨	Formation potential of tropospheric ozone kg NMVOC eq. ⑩	Abiotic depletion potential (ADP-elements) for non fossil resources (+A2) kg Sbe ⑪	Abiotic depletion potential (ADP-fossil fuels) for fossil resources (+A2) MJ ⑫	Water use m3 deprived ⑬
A1-A3 ① Construction Materials	8,47E+05	8,47E+05	0,00E+00	5,30E+02	7,30E-09	9,08E+02	0,00E+00	3,36E+02	3,67E+03	1,04E+03	6,39E-02	4,96E+06	3,60E+04
A4 ① Transportation to site	4,25E+04	4,25E+04		1,34E+00	9,18E-03	6,39E+01	3,25E-01	7,69E+00	8,35E+01	3,52E+01	1,38E+01	5,88E+05	1,50E+00
A5 ① Construction/installation process	4,19E+04	4,18E+04	0,00E+00	3,57E+01	3,80E-04	6,09E+01	1,34E-02	2,21E+01	2,42E+02	6,70E+01	9,36E-01	3,04E+05	1,77E+03
B1 ① Use phase													
B2 Maintenance													
B3 ① Repair	0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B4-B5 ① Material replacement and refurbishment													
B6 ① Energy consumption	0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
B7 ① Water use													
C1-C4 ① End of life	5,87E+04	5,84E+04	0,00E+00	2,70E+02	1,81E-10	3,87E+02	0,00E+00	1,47E+02	1,62E+03	4,14E+02	2,28E-02	8,72E+05	5,69E+03
D ① External impacts (not included in totals)	-9,50E+03	-9,46E+03		-4,32E+01	-1,22E-10	-3,13E+01	0,00E+00	-1,22E+01	-1,34E+02	-2,88E+01	-1,93E-03	-1,25E+05	-2,30E+02
Total	9,90E+05	9,89E+05	0,00E+00	8,37E+02	9,56E-03	1,42E+03	3,38E-01	5,13E+02	5,62E+03	1,55E+03	1,48E+01	6,73E+06	4,34E+04
Results per denominator													
Per gross internal floor area m2 / year	1,31E+00	1,30E+00	0,00E+00	1,10E-03	1,26E-08	1,87E-03	4,46E-07	6,77E-04	7,41E-03	2,05E-03	1,92E-05	8,87E+00	5,73E-02
Per gross internal floor area m2	6,53E+01	6,52E+01	0,00E+00	5,52E-02	6,30E-07	9,36E-02	2,23E-05	3,38E-02	3,71E-01	1,02E-01	9,61E-04	4,43E+02	2,86E+00

Most contributing materials (Global Warming Potential total)

[Compare data](#)

No.	Resource	Cradle to gate impacts (A1-A3)	Of cradle to gate (A1-A3)	Sustainable alternatives
1.	Ready-mix concrete, C30/37, 2360.0 kg/m3, EN15804+A2  ?	643 tonnes CO ₂ e	75.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
2.	Facing brick, 1800 kg/m3, EN15804+A2  ?	185 tonnes CO ₂ e	21.9 %	Show sustainable alternatives Add to compare
3.	Cement screed, EN15804+A2  ?	19 tonnes CO ₂ e	2.2 %	Show sustainable alternatives Add to compare

Life-cycle overview of Global Warming Potential total



Einzelseiten des GEG-Energieausweises der Goetheschule

1 Aufgabenstellung

Das Gymnasium Goetheschule in Hannover-Herrenhausen wurde saniert und erweitert. Die hochbauliche Planung wurde von ppp architekten + stadtplaner gmbh aus Lübeck durchgeführt. Mit diesem Schritt der Planung wird der bereits erstellte ENEV-Nachweis für den Gesamtgebäudekomplex an die Umsetzung angepasst und auf das heute gültige GEG umgestellt. Zusätzlich wird der PHPP-Nachweis für den Neubauteil D (BA2) ebenfalls auf den gebauten Stand aktualisiert.

Der Komplex besteht aus Neubau, Erweiterung und Sanierung. Der Nachweis gemäß GEG wird als Neubaunachweis für alle Gebäudeteile gemeinsam geführt (Ziel: Ein Energieausweis/ Aushang für den gesamten Komplex). Aufgrund der energetisch hochwertigen Planung (Neubau Passivhaus/ Sanierung und Erweiterung ENEV -30%) werden die gesetzlichen Neubauanforderungen trotz Sanierungsanteil deutlich übererfüllt (obwohl vom Gesetzgeber nicht gefordert).

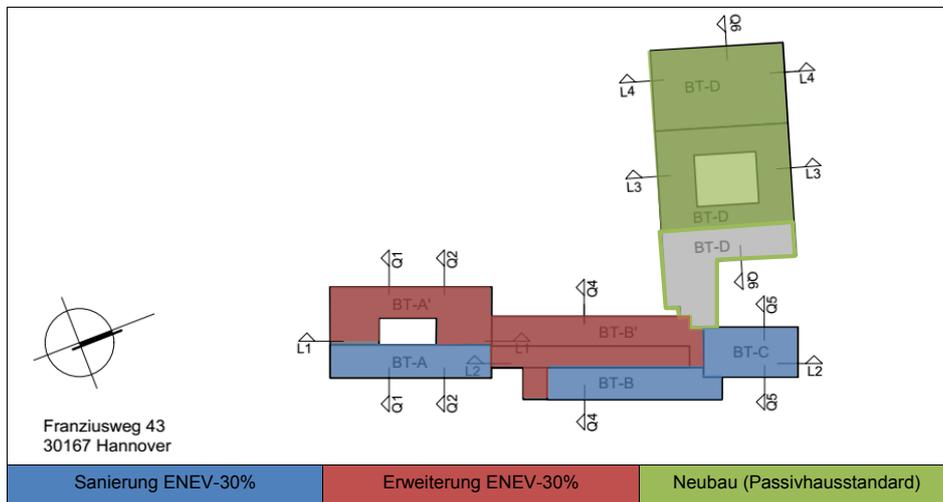


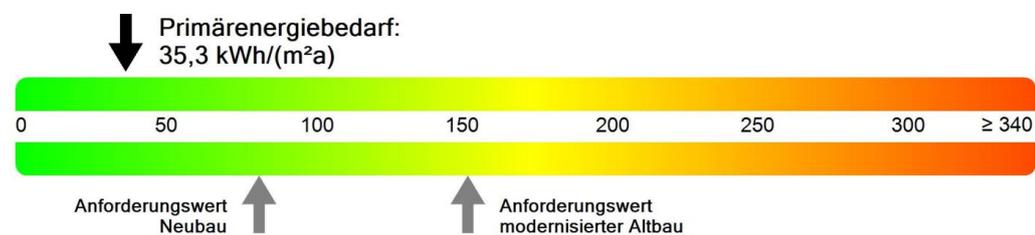
Abbildung 1: Lageplan mit Kennzeichnung Bauteile (Teilabschnitt Bauteil D grün eingerahmt bereits fertiggestellt)

Gebäudeergebnisse

Gebäude

GEG-Werte	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)]	35,34	80,61	43,8 % (zulässig)

Mittlere U-Werte [W/(m ² K)]	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
Opake Außenbauteile (>= 19 °C)	0,15	0,28	53,6 %
Transparente Außenbauteile (>= 19 °C)	0,79	1,5	52,7 %
Opake Außenbauteile (12-19 °C)	0,28	0,50	56,0 %



Wesentliche Angaben für Anzeigen nach GEG §87

1. Art des Energieausweises	Energiebedarfsausweis
2a. Endenergiebedarf Wärme (heizwertbezogen)	52,3 kWh/(m ² a)
2b. Endenergiebedarf Strom	12,4 kWh/(m ² a)
3. Wesentliche Energieträger	KWK fossil

Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Variante "Ausgangsfall".

Nutzung von erneuerbaren Energien für Wärme-/Kälteerzeugung

Maßnahme	Erzeuger	Abschnitt GEG	Anforderung gemäß GEG	durch Maßnahme gedeckter Anteil	Anteil GEG
Wärmenetze	Nah-/Fernwärme 1	§ 44	50,0 %	86,0 %	172,0 %
Maßnahmen zur Einsparung von Energie		§ 45	15,0 %	44,0 %	293,3 %
Gesamt		§ 10 Abs. 2 Nr. 3			465,3 %

Berechnungsschritte des Excel-Tools

Berechnungsschritt globales Budget					
weitere Rechenschritte innerhalb 2024 durchführbar, für spätere Berechnungen sind aktuelle Daten zu ergänzen!					
Dateneingabe			mögliche Werte		
Gradziel Erwärmung	1,7°C		1,5 - 1,7 - 2		
Wahrscheinlichkeit	67%		17 - 33 - 50 - 67 - 83		
Globales Budget 2020	700,00 Mrd. t CO2				
Zeitpunkt Berechnung	19.05.2024 11:36:34				
aktuelle Emissionen	1.166,92 t CO2/a				
Emissionen seit 2020	159,80 Mrd. t CO2		Restbudget 2024		
aktuelles Restbudget	540,20 Mrd. t CO2		554,22 Mrd. t CO2	Startwert	
verbleibende Zeit bei gleichbleibenden Emissionen	14,68 Jahre				
max. Zieltemperatur	19.04.2038				
Mit dem Ziel einer globalen Erwärmung von maximal 1,7°C bei 67% Wahrscheinlichkeit gegenüber dem vorindustriellen Wert liegt das weltweite Budget ab heute bei 540,2 Mrd. t CO2. Für die weitere Berechnung wird das Budget zu Jahresbeginn 2024 von 554,22 Mrd. t CO2 genutzt.					
Globales Budget Beginn 2020 in Mrd. t CO2					
Erwärmung um °C	Wahrscheinlichkeit der Einhaltung				
	17%	33%	50%	67%	83%
1,5°C	900	650	500	400	300
1,7°C	1450	1050	850	700	550
2°C	2300	1700	1350	1150	900
Quelle: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf#page=33					
Jährliche globale Emissionen in Mrd. t CO2					
2020	35,01				
2021	36,82				
2022	37,15				
2023	36,80	Prognose; bei Veröffentlichung überschreiben			
2024	36,80	Prognose aus Vorjahr			
tägliche Emissionen 2024	0,101				
Quelle: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/					
Datum	Zeitraum	in Tage	emittiert		
19.05.24	01.01.24	139	14,0246 Mrd. t CO2		
	Summe seit 2020		159,8046 Mrd. t CO2		
	Summe seit 2020-2023		145,7800 Mrd. t CO2		
Globales Budget HEUTE in Mrd. t CO2					
Erwärmung um °C	Wahrscheinlichkeit der Einhaltung				
	17%	33%	50%	67%	83%
1,5°C	740	490	340	240	140
1,7°C	1290	890	690	540	390
2°C	2140	1540	1190	990	740
Quelle: Nur zur Information, keine Berechnungsgrundlage!					

Berechnungsschritt nationales Budget					
Dateneingabe					
Globales Budget 2024	554,22	Mrd. t CO2		1	Einwohnerzahl
Verteilung nach	1	Szenario		2	BIP proportional
gewählt	Einwohnerzahl			3	BIP umgekehrt 10%
Anteil an Budget	1,04%			4	Landfläche
Nationales Budget 2024	5,75	Mrd. t CO2		5	Grandfathering 2023
				6	Grandfathering 1990
				7	Biokapazität
Einwohnerzahl					Quelle:
Weltweit	8.100.000.000	2023	554,22	Mrd. t CO2	Statista
🇩🇪 Deutschland	84.079.811	1,04%	5,75	Mrd. t CO2	Bing/Excelintegration
BIP proportional					Quelle:
Weltweit in \$	104.500.000.000.000	2021	554,22	Mrd. t CO2	Weltbank
🇩🇪 Deutschland	\$ 3.845.630.030.824	3,68%	20,40	Mrd. t CO2	Bing/Excelintegration
BIP umgekehrt 10%					Quelle:
Weltweit in \$	104.500.000.000.000	2021	554,22	Mrd. t CO2	Weltbank
🇩🇪 Deutschland	\$ 3.845.630.030.824	0,67%	3,71	Mrd. t CO2	Bing/Excelintegration
Landfläche					Quelle:
Weltweit in km2	149.000.000		554,22	Mrd. t CO2	Statista
🇩🇪 Deutschland	357.588	0,24%	1,33	Mrd. t CO2	Bing/Excelintegration
Grandfathering 2023					Quelle:
Weltweit in Mrd. t CO2	36,80	2023	554,22	Mrd. t CO2	Statista, Tabelle globales Budget
🇩🇪 Deutschland	0,73	1,98%	10,96	Mrd. t CO2	Bing/Excelintegration kt/a in Mrd. t/a
Grandfathering 1990					Quelle:
Weltweit in Mio. t CO2	22.753	1990	554,22	Mrd. t CO2	Umweltbundesamt; Global Carbon Footprint Network
🇩🇪 Deutschland	1.052	4,62%	25,62	Mrd. t CO2	
Biokapazität					Quelle:
Weltweit in gha	12.044.118.589	2022	554,22	Mrd. t CO2	data.footprintnetwork.org
🇩🇪 Deutschland	134.603.516	1,12%	6,19	Mrd. t CO2	

Berechnungsschritt Bauaktivität			
Dateneingabe			
Deutsches Budget 2024	5,75	Mrd. t CO2	
Anteil Gebäudesektor	% optional		Referenz 40,2%
Gebäude Budget 2024	2,31	Mrd. t CO2	
Neubaurate	1,0%	Szenario	
Sanierungsrate	1,5%	Szenario	
Sanierungszyklus	50	Jahre	
Abrissrate (unsaniert)	0,5%	Szenario	
Start Saniert/Neubau	% optional		Referenz 2,5%
Betrachtungszeitraum	2100	Jahr	2021-2100
Bestand m2 in 2100	11.363,15	Mio. m2	
Neubau m2 bis 2100	7.374,08	Mio. m2	
Sanierung m2 bis 2100	9.748,60	Mio. m2	
Rest unsaniert in 2100	0,00	Mio. m2	
Referenzdaten Anteil Gebäude-Baubranche an CO2-Emissionen			
Errichtung + Nutzung	40,2%	2014	Hochbauen, Anteil an Baubranche
Nutzung	33%	2014	Hochbauen, davon
Herstellung, Errichtung, Mo- andere	7% 60%	2014	Hochbauen, davon
Referenzdaten Gebäudebestand in m2			
Wohngebäude	3.967.862.000	2021	Wohngebäude
Nichtwohngebäude	3.507.000.000	2021	Bruttogrundfläche
Gebäudebestand 2021	7.474.862.000	m2	
Ergänzung: Berechnung Fläche GEG-Nichtwohngebäude (NWG)			
2010-2020	26.000.000	m2	jährlich fertiggestellt
2010-2020	24.500		Anzahl jährlich fertiggestellt
Durchschnittlich	1.061,22	m2	Nutzfläche pro Gebäude
Anzahl Gebäude NWG	1.980.000	2021	GEG relevant
Fläche Bestand NWG	2.101.224.490	m2	GEG relevant
Gebäudebestand 2021	2,5%	2021	Energieeffizienzklasse A+
Wohnfläche/Person	47,19	m2/Person	in Deutschland
Treibhausgasfußabdruck der Bauindustrie 2020			
Grundstoffindustrie	2,3%		
vorgelagerte Zulieferer	10,6%		
Baustoffindustrie	9,9%		
direkte Emissionen Hochbauwirtschaft	2,6%		
Nutzung und Betrieb	74,6%		

Quelle:
BBSR 2020, S.17
<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr->

Quelle:
DENA-Gebäudereport 2023
IWU, Forschungsdatenbank

Quelle:
DENA-Gebäudereport 2023
DENA-Gebäudereport 2023, IWU

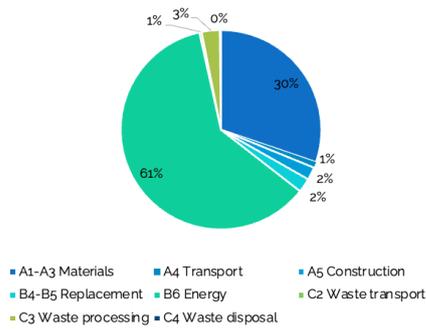
McMakler Datensatz 2021

bbsr Veröffentlichung -online-17-2020

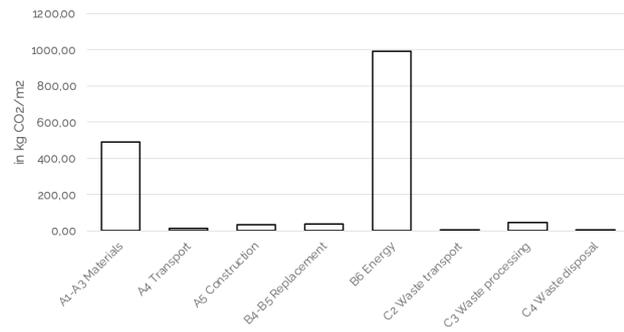
Berechnungsschritt Betrieb / Nutzung									
Reduktion	2	1	Reduktion bis 2045 (linear)						
	Reduktion bis 2045 (Altbestandsfaktor)	2	Reduktion bis 2045 (Altbestandsfaktor)						
		3	detailliert						
Emissionen Nutzung	1,70	Mrd. t CO2	2024-2045						
verbleibend von 2,31	0,62	Mrd. t CO2	Restbudget ohne Nutzung						
Reduktion bis 2045		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
		1	0,96	0,92	0,88	0,84	0,8	0,76	0,72
	DE CO2-Emissionen	204,163	195,656	187,150	178,643	170,136	161,629	153,122	
in Mrd. t CO2 (DE)		212,67							
Reduktion bis 2045 (Altbestandsfaktor)		199,975	187,609	175,575	163,875	152,511	141,486	130,803	
detailliert	Zu-/Abnahme jährlich	2022	2023	2024	2025				
Anteil Kälte-/Wärmeerzeuger	in Gesamtrelation								
Wärmepumpe	25,0%	4,98%	0,06	6,71%	0,08	8,97%	0,11	11,85%	
Öl	-10,0%	24,97%	0,22	24,23%	0,22	23,30%	0,21	22,16%	
Gas	-10,0%	63,26%	0,57	61,37%	0,55	59,01%	0,53	56,13%	
Kohle	-30,0%	0,55%	0,00	0,42%	0,00	0,31%	0,00	0,23%	
Biomasse	10,0%	4,27%	0,05	5,06%	0,06	5,95%	0,07	6,92%	
Fernwärme	5,0%	1,70%	0,02	1,92%	0,02	2,15%	0,02	2,39%	
BHKW	0,0%	0,27%	0,00	0,29%	0,00	0,31%	0,00	0,32%	
Kälte-/Wärmebedarf Bestand	in TWh	686,00	664,84	643,97	623,38				
	-1,0% /Mio m2	0,096	0,10	0,09	0,09				
Wärmebedarf Neu/San	-0,5% in TWh	18,69	27,94	37,14	46,30				
Startwert	50 kWh/m2*a		49,75	49,50	49,25				
Wärmepumpe COP	2,0%	2,90	2,92	2,94	2,96				
Emissionsfaktoren	t CO2/MWh Emissionen								
Wärmepumpe Strom	-5,0%	0,15	0,14	6,32	0,13	7,71	0,13	9,31	
Öl	0,0%	0,27	0,27	42,85	0,27	39,91	0,27	36,74	
Gas	0,0%	0,20	0,20	82,01	0,20	76,38	0,20	70,33	
Kohle	0,0%	0,38	0,38	1,06	0,38	0,77	0,38	0,55	
Biomasse	0,0%	0,03	0,03	0,91	0,03	1,03	0,03	1,16	
Fernwärme	0,0%	0,28	0,28	3,58	0,28	3,89	0,28	4,17	
BHKW (Gas)	-2,0%	0,20	0,20	0,38	0,19	0,38	0,19	0,38	
Strombedarf	-2,0%	151,01	147,98	20,94	145,03	19,37	142,12	17,91	
Summe aus Bestand	Mio t CO2	143,79	158,04	130,07	122,65				
Summe aus Neu/San	Mio t CO2	2,80	3,95	4,96	5,83				
Emissionen gesamt ab 2024	1695,99 Mio t CO2	146,59	161,99	135,03	128,48				
direkte fossile CO2-Emissionen	795,06 Mio t CO2	134,24	125,92	117,06	107,62				
Anteil des Wärmeverbrauchs am Endenergieverbrauch Deutschland 2021 in TWh									
Raumwärme	28,0%	674	x	Quelle: Umweltbundesamt 2023					
Warmwasser	5,5%	132							
sonstige Prozesswärme	22,6%	544							
Klimakälte	0,5%	12	x						
sonstige Prozesskälte	2,3%	55							
andere Anwendungsbereiche	41,2%	992							
Summe		2407	relevant: 686						
GEWÄHLT: Wärmeerzeuger im Bestand 2020									
Quelle: DENA Gebäudereport 2023									
eigene Berechnung									
		TWh	t CO2/TWh	t CO2					
Wärmepumpen COP2,9	1.070.000	4,98%	34,19	150.000	5.127.986				
Öl-Heizwert	4.620.000	21,52%	147,61	266.000	39.264.076				
Gas-Heizwert	6.803.960	31,69%	217,39	201.000	43.694.783				
Öl-Brennwert	742.000	3,46%	23,71	266.000	6.306.049				
Gas-Brennwert	6.777.640	31,57%	216,55	201.000	43.525.756				
Kohle	118.650	0,55%	3,79	335.000	1.269.943				
Biomasse	916.960	4,27%	29,30	27.000	791.017				
Fernwärme	364.376	1,70%	11,64	280.000	3.259.715				
BHKW (bis 50kW)	57.261	0,27%	1,83	280.000	512.258				
Solarthermie (ausgenommen)	2.470.000		0,00	0,00		Hinweis: Nach Anzahl der Anlagen, nicht an m2 gekoppelt. Ungeachtet, ob die Anlage Primärheizung ist. Ohne reine WW-Erzeuger			

Berechnungsschritt CO2-Aspekte									
Dateneingabe									
Budget Gebäude 2022	2.312,68	Mio t CO2							
direkte CO2-Emissionen	1.697,42	Mio t CO2	Betrieb / Nutzung						
Budget Bau 2024	615,25	Mio t CO2							
Wirkungsfaktor CO2		<i>optional</i>							
Budget Bau	699,15	Mio t CO2-Äq.						Referenzanteil CO2 an Treibhausgaspotential in DE: 0,88	
mittleres Budget /m2 jährlich bei 50 Jahre	40,83	kg CO2-Äq/m2							
	0,82	kg CO2-Äq/m2*a							
Wahl der Berechnungsvariante									
Erklärung: Variante 1, wenn CO2-Baunneutralität in definiertem Jahr als Ziel gesetzt wird, Variante 2 bei Restbudgetorientierter Reduktion									
gewählte Variante	Variante 1								
V1: mit definierter CO2-Neutralität									
Baunneutralität bis	2045	linear senken							
Budget Bau/San 2024	0,70	Mrd t CO2						<i>Annahme: Ab 2045 weisen alle in Deutschland zu errichtenden Gebäude CO2-Neutralität bezüglich Errichtung und Sanierung auf.</i>	
Budget bis Neutralität	326	kg CO2-Äq/m2							
Lebensdauer/Zyklus	50	Jahre							
Budget Bau/San 2024	6,51	kg CO2-Äq/m2*a							
Betrachtungsjahr	2026	Abfrage							
Budget Bau/San 2026	5,89	kg CO2-Äq/m2*a							
Restbudget 2026	0,52	Mrd t CO2-Äq							
V2: lineare budgetorientierte Reduzierung									
Emissionen 2021 Start	5,00	<i>optional</i>							Referenz 9,4kg CO2-Äq/m2*a
Neutralität erforderlich	2051							Kontrolle: ✓	
Referenzdaten Anteil Gebäudebaubranche an CO2-Emissionen; 3 Bauaktivität									
Bestand Zieljahr 2100	11.363,15	Mio m2							
Summe Neubau	7.374,08	Mio m2	bis 2100					aus Tabellenblatt Bauaktivität	
Summe Sanierung	9.748,60	Mio m2	bis 2100						
Summe Bauaktivität	17.122,68	Mio m2	bis 2100						
verbleibend unsaniert	0,00	Mio m2							
Referenzdaten Nutzungsemissionen Wohn- und Nichtwohngebäude in Mio t CO2-Äq									
direkt	117	2014	Verbrennung direkt					Quelle: BBSR 2020	
indirekt	180	2014	Strom, Bauprodukte vorgelagert						
Summe	297		<i>angewandt auf 2021</i>						
CO2 Referenzwerte									
Grenzwert	9,4	kg CO2-Äq/m2 *a	2021 DGNB					Quelle: DGNB 2021	
Studie 50 Gebäude	8,7	kg CO2-Äq/m2 *a	2021 DGNB						

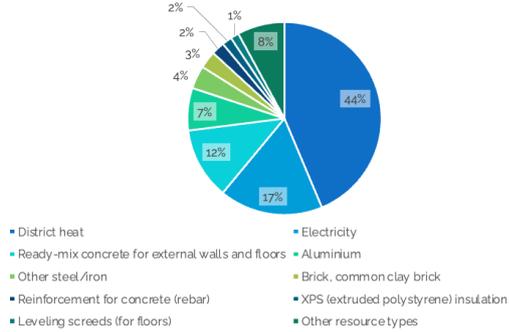
THG-Emissionen nach Lebenszyklusphase



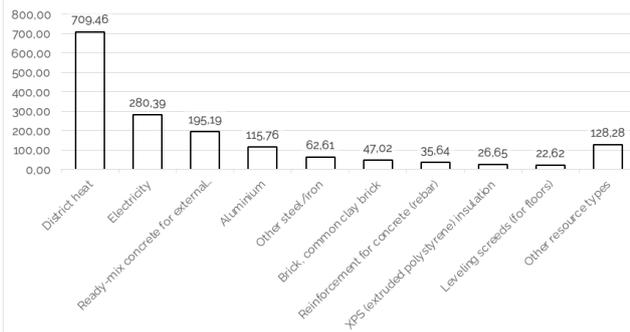
THG-Emissionen nach Lebenszyklusphase



nach Ressourcentyp



nach Ressourcentyp



Dateneingabe Goetheschule Hannover

Category	A1-A3 Materials	A4 Transport	A5 Construction	B4-B5 Replacement	B6 Energy	C2 Waste transport	C3 Waste processing	C4 Waste disposal	Summe	Nutzfläche in m2	CO2e/m2*a
Global Warming Potential total kg CO2e	7.453.804,95	231.031,43	510.231,99	566.144,11	15.016.002,44	89.479,12	717.954,27	45.755,53	24.630.403,83	15.170,00	
2 - Gebäude A	2.214.372,05	77.635,44	154.571,17	162.702,89	5.211.553,83	29.188,94	167.901,72	15.605,39	8.033.531,43	5.265,00	30,52
2 - Gebäude B	1.613.161,21	56.041,83	110.739,11	151.537,12	3.539.699,68	20.790,56	154.939,29	11.552,10	5.658.460,91	3.576,00	31,65
2 - Gebäude C	413.232,67	14.425,66	33.027,26	43.449,45	1.073.976,10	6.046,10	38.455,27	3.217,14	1.625.829,65	1.085,00	29,97
2 - Gebäude D	3.213.039,01	82.928,51	211.894,45	208.454,65	5.190.772,83	33.453,53	356.657,98	15.380,88	9.312.581,84	5.244,00	35,52
kg CO2e/m2	491,35	15,23	33,63	37,32	989,85	5,90	47,33	3,02	1.623,63	embodied	
2 - Gebäude A	420,58	14,75	29,36	30,90	989,85	5,54	31,89	2,96	1.525,84	486,34	
2 - Gebäude B	451,11	15,67	30,97	42,38	989,85	5,81	43,33	3,23	1.582,34	540,04	
2 - Gebäude C	380,86	13,30	30,44	40,05	989,84	5,57	35,44	2,97	1.498,46	459,31	
2 - Gebäude D	612,71	15,81	40,41	39,75	989,85	6,38	68,01	2,93	1.775,85	723,40	
embodied carbon	491,35			37,32			47,33	3,02			579,02
										pro Jahr	11,58
Global warming potential total kg CO2e - Resource types											
Category	Global Warming Potential - Resource types				50 Jahre						
total kg CO2e	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C	Gebäude D	kg CO2e/m2	kg CO2e/m2*a	Filter				
District heat	3.735.283,85	2.537.015,64	769.757,71	3.720.391,54	709,46	14,19					
Electricity	1.476.269,98	1.002.684,04	304.218,38	1.470.381,30	280,39	5,61					
Ready-mix concrete for external walls and floors	901.953,88	617.310,00	257.603,78	1.184.197,90	195,19	3,90	x				
Aluminium	472.610,56	279.594,71	50.802,19	953.075,72	115,76	2,32	x				
Other steel/iron	206.994,97	240.639,60	50.785,29	451.424,44	62,61	1,25	x				
Brick, common clay brick	197.572,66	171.085,72	32.770,35	311.852,93	47,02	0,94	x				
Reinforcement for concrete (rebar)	192.061,90	135.212,11	25.131,12	188.259,21	35,64	0,71	x				
XPS (extruded polystyrene) insulation	154.543,00	87.818,84	24.292,34	137.550,84	26,65	0,53	x				
Leveling screeds (for floors)	102.447,37	86.772,63	19.227,60	134.755,81	22,62	0,45	x				
Other resource types	593.793,26	500.327,61	91.240,89	760.692,16	128,28	2,57	x				
total	8.033.531,43	5.658.460,91	1.625.829,65	9.312.581,84	1.623,63	32,47	12,68				
Gegenüberstellung ohne B6	10,72	11,85	10,17	15,72							

Bericht aus den gewählten Szenarien im Excel-Tool

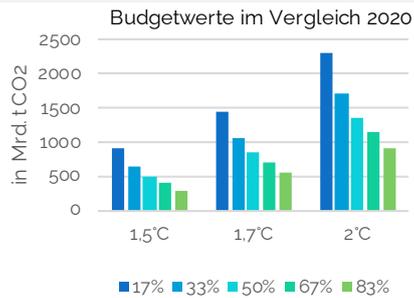
Budgetberechnung nach ausgewählten Szenarien - Report

Budgetberechnung REPORT

Die Budgetberechnung basiert auf zuvor gewählten Szenarien. Zur Bearbeitung sind die Schritte 1-5 abzurufen. Sie dienen außerdem der Nachvollziehbarkeit und geben Auskunft über Datenquellen und Referenzen zu einzelnen Berechnungsschritten. Berechnungsjahr: 2024

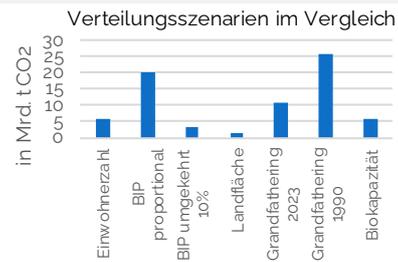
Globales Budget	nach IPCC
Gradziel Erwärmung	1,7 °C
Wahrscheinlichkeit	67 %
Globales Budget 2020	700 Mrd. t CO ₂
Restbudget 2024	554 Mrd. t CO ₂

Unter der Zielsetzung, die Klimaerwärmung auf 1,7°C mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% gegenüber dem vorindustriellen Wert zu begrenzen, berechnet die IPCC ein Budget von 700 Mrd. t CO₂ für 2020, wovon 2024 ein Restbudget von 554,22 Mrd. t CO₂ verbleibt.



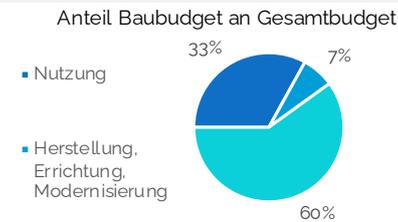
Nationales Budget	
Verteilung nach	1 Einwohnerzahl
Anteil an Budget	1,04 %
Deutsches Budget	5,75 Mrd. t CO ₂

Bei einer Verteilung nach Einwohnerzahl stehend Deutschland 1,04% des Budgets zu, was 5,75 Mrd. t CO₂ entspricht.



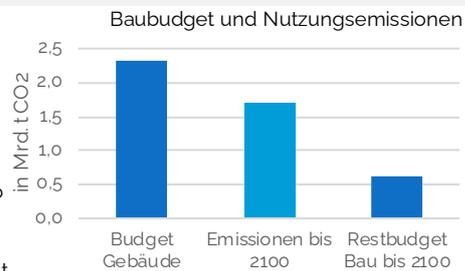
Gebäudesektorielles Budget	
Anteil Gebäude	40,20 %
Budget Gebäude	2,31 Mrd. t CO ₂
Davon Nutzung	82,09 %

Es entfallen laut BBSR 40,2% der nationalen THG-Emissionen auf die Gebäude, davon 82% auf die Nutzung.



Nutzungsemissionen	
Emissionen nach	2 Reduktion bis 2045 (Altbestandsfaktor)
Emissionen bis 2100	1,70 Mrd. t CO ₂
Restbudget Bau bis 2100	0,62 Mrd. t CO ₂

Die Nutzungsemissionen werden im gewählten Szenario 'Reduktion bis 2045 (Altbestandsfaktor)' angesetzt. Von 2,31 Mrd. t CO₂ verbleiben nach Abzug von 1,92 Mrd. t CO₂ für die Nutzungsemissionen bis 2100 noch 0,4 Mrd. t CO₂ für Bau und Sanierung.



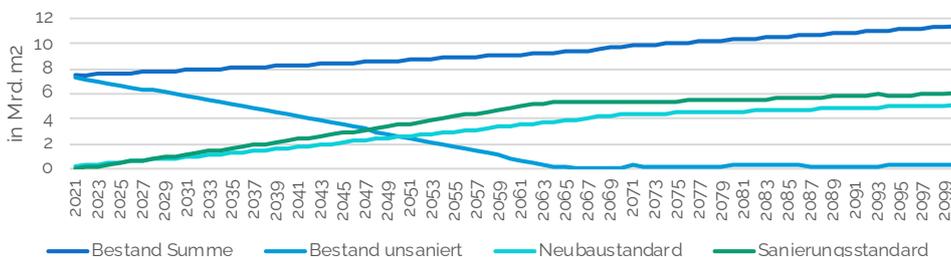
Budgetberechnung nach ausgewählten Szenarien - Report

Treibhausgaswirkung

Wirkungsanteil CO ₂ /THG	88,0 %	Aus dem Wirkungsfaktor von CO ₂ am Treibhausgaseffekt wird das Budget relativ ermittelt. Durch den Faktor 88 % wird ein THG-Restbudget von 0,7 Mrd. t CO ₂ -Äq. berechnet.
Budget ohne Nutzung	0,70 Mrd. t CO ₂ -Äq.	

Bauaktivität

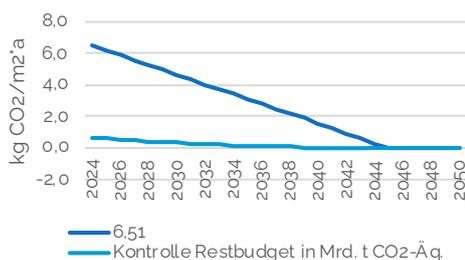
Gebäudebestand 2021	7,47 Mrd. m ²	Ausgehend von einem Gebäudebestand im Jahr 2021 von 7,47 Mrd. m ² , wovon 2,5 % den energetischen Mindeststandard erfüllen, wird eine Neubaurate von jährlich 1 % angenommen. Bestandsgebäude werden mit 0,5 % Abrissrate (unsaniert) zurückgebaut und der Bestand zu jährlich 1,5 % saniert. Der Lebenszyklus beträgt 50 Jahre, anschließend fällt ein Neubau oder Sanierungsgebäude zurück in den Altbestand.
Neubaurate	1,0 %	
Sanierungsrate	1,5 %	
Abrissrate (unsaniert)	0,5 %	
Erfüllung	2,5 %	
Mindeststandard in 2021		
Gebäudelebenszyklus	50 Jahre	



Budgetverteilung Variante 1 mit definierter CO₂-Neutralität bis 2045

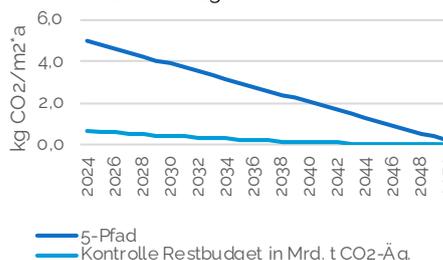
Variante 1	2045	THG-Emissionsneutralität	6,51	kg CO ₂ -Äq/m ² a in 2024
Variante 2	5,00	Startwert 2024 kg CO ₂ -Äq/m ² a	2051	THG-Emissionsneutralität erforderlich bis

Variante 1: Zielneutralität



Mit dem Ziel einer Netto-THG-Emissionsneutralität bis 2045 dürfen bei linearer Reduktion im Jahr 2024 noch 6,51 kg CO₂-Äq/m²a für Bau und Sanierung emittiert werden.

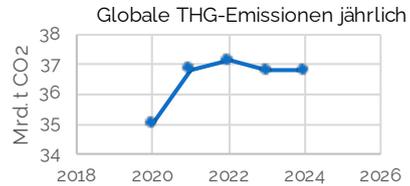
Variante 2: Restbudgetorientiert



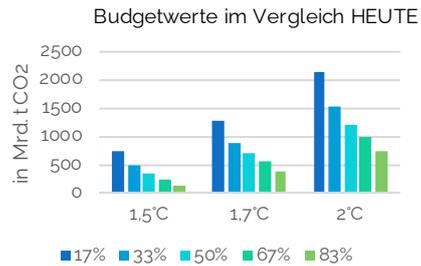
Liegen die aktuellen Emissionen für Bau und Sanierung bei 5 kg CO₂/m²a, erfordert die lineare Reduktion eine Netto-THG-Emissionsneutralität bis 2051.

Methode REPORT

Zeitpunkt Auswertung 19.05.24 11:04
 Budget 2020 700,0 Mrd. t CO₂
 1,7°C 67%
 tägliche Emissionen 2024 0,101 Mrd. t CO₂
 Emissionen seit 2020 159,8 Mrd. t CO₂

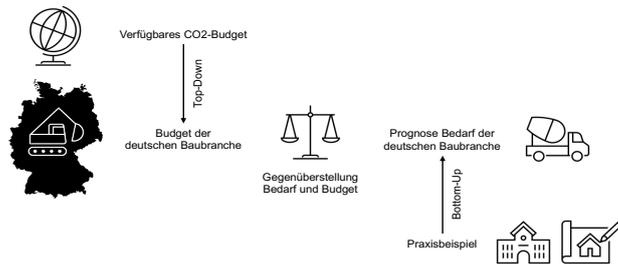


Verbleibendes Budget 540,20 Mrd. t CO₂
 Aufgebraucht im Jahr **2038**
 Verbleibende Zeit 14,68 Jahre

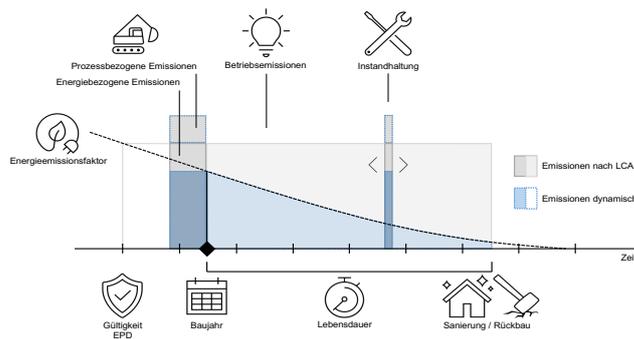


Grafische Erläuterung der Methode

In einem Top-Down-Verfahren werden globale Budgetwerte nach Szenarien verteilt, um einen Indikatorwert an Treibhausgas-Emissionen pro m² je Jahr zu ermitteln. Diesem Wert kann ein Beispielgebäude gegenübergestellt werden, um dessen Konformität zu verifizieren. Das Bauwerk wird in einem Bottom-Up-Prozess über eine Lebenszyklusanalyse zu einem möglichen Baujahr bilanziert.



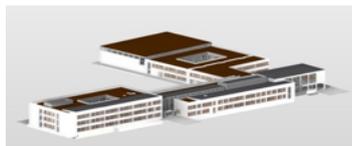
Da bei der Lebenszyklusbetrachtung auf vorliegende Daten zurückgegriffen wird, berechnet das Tool eine zeitliche Verschiebung der Bauausführung und kalkuliert nach vorgegebenen Szenarien einen realistischen Emissionswert. Damit wird überprüft, ob das Gebäude bei gleicher Bauweise den zuvor berechneten Budgetwerten in der Zukunft entsprechen kann.



Gebäudeanalyse REPORT

Die Berechnung der Gebäudedaten basiert auf zuvor getätigten Eingaben. Zur Bearbeitung sind die Schritte des Tabellenblatts Gebäudedaten abzurufen. Sie dienen außerdem der Nachvollziehbarkeit und geben Auskunft über Datenquellen. Berechnungsjaar: 2024

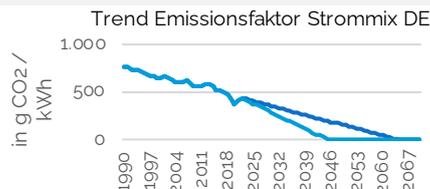
Gebäudedaten	Goetheschule Hannover
Adresse	Franziusweg 43, 30167 Hannover
Gebäudetyp	Gebäude für Bildung, Wissenschaft und Forschung
Baujahr	2021 Szenario 2030
Nutzfläche	15.136 m ²
Projektbeschreibung	Sanierung mit Neubau und Erweiterung einer Schule in zwei Bauabschnitten.



Visualisierung: M.Sc. Leander Präger

Emissionsfaktor und LCA

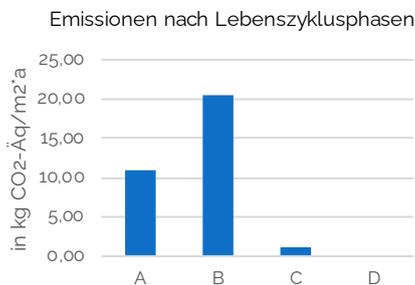
Lebenszyklus	50 Jahre
Gültigkeit der EPDs	2021
Emissionsneutralität Energie	2045
Datengrundlage	ÖKOBAUDAT 2021-II (25.06.2021)



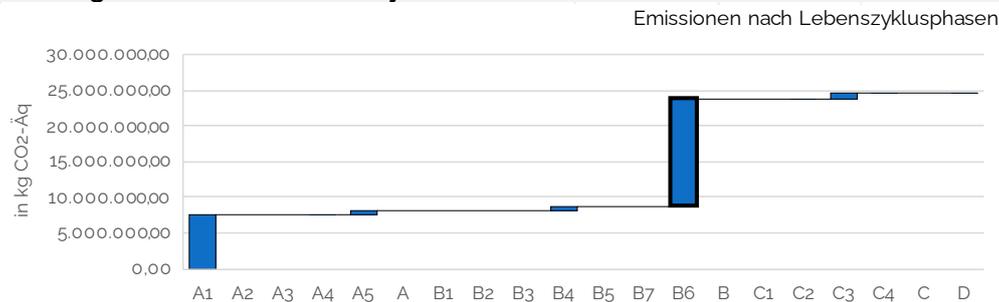
Emissionen in kg CO₂/m²*a

A Herstellung	10,83
B Nutzung	20,59
C Entsorgung	1,13
D Recyclingpot.	0,00
Summe	32,55

Es wird eine Emissionsneutralität für genutzte Energie (Strom und Wärme) bis 2045 vorausgesetzt. Die EPDs der Lebenszyklusanalyse gelten für das Jahr 2021 bei einem erwarteten Lebenszyklus von 50 Jahren.

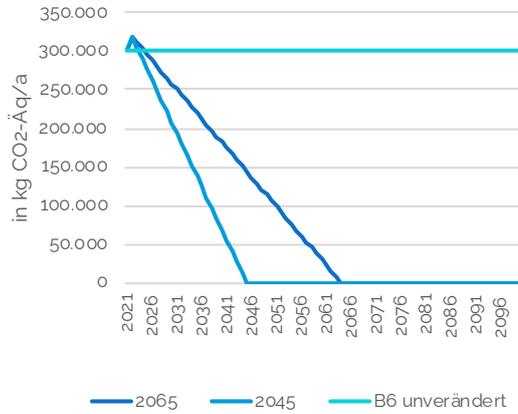


Nutzungsemissionen im Lebenszyklus



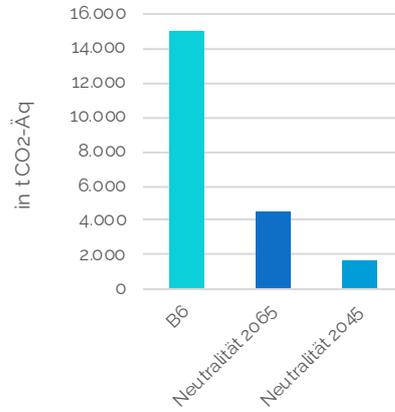
Budgetberechnung nach ausgewählten Szenarien - Report

Phase B6 unter Emissionsfaktor



THG-Emissionen aus Phase B6 gegenüber linearen Reduktionsfaktoren

Emissionen nach Szenario Baujahr 2030



THG-Emissionen der Phase B6 bei späterem Realisierungszeitraum

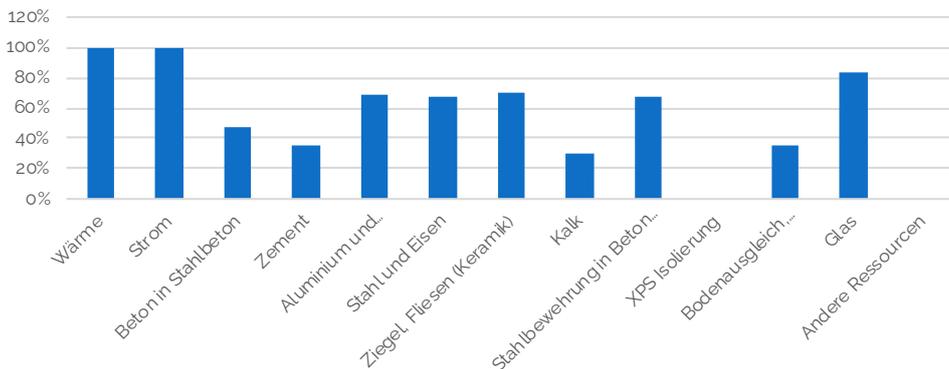
Nutzungsemissionen nach LCA B6	15.016.002,44 kg CO ₂ -Äq	Reduktion B6 um
mit Reduktionsfaktor bis 2065	4.516.932,56 kg CO ₂ -Äq	69,9%
mit Reduktionsfaktor bis 2045	1.658.607,44 kg CO ₂ -Äq	89,0%
Emissionen Phase B und C (ohne B6)	1.419.333,02 kg CO ₂ -Äq	Reduktion um
Anteil an Gesamtemissionen		5,8%

In der Betriebsphase Phase B6 des Beispielgebäudes ist bei der Baujahresverschiebung bis zum Szenario 2030 eine Reduktion der Emissionen mit Reduktionsfaktor bis 2065 um 69,9 % möglich. Bei der Variante mit Reduktionsfaktor bis 2045 werden Emissionen der Phase B6 um 89 % geringer ausfallen.

Da die Emissionen dieser Phasen zu 100 % energiebedingt sind, wird der Korrekturfaktor direkt angewandt.

Emissionsprognose 2030

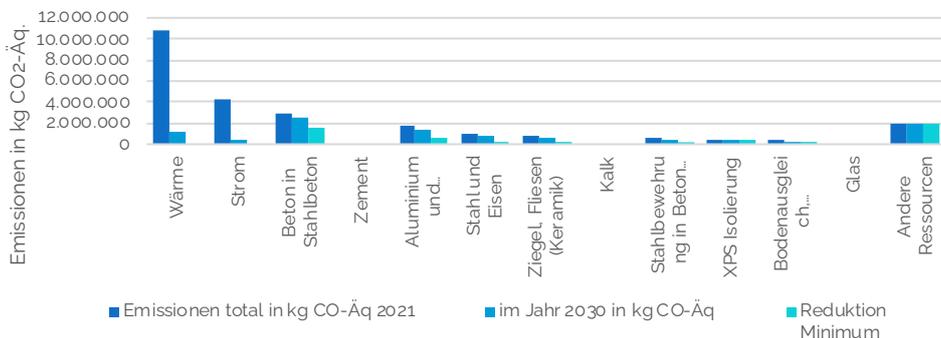
Anteil energiebedingter Emissionen nach Ressourcentyp



Budgetberechnung nach ausgewählten Szenarien - Report

Ressourcenkategorie	Emissionen total in kg CO ₂ -Äq 2021	energiebed. Emissionen	im Jahr 2030 in kg CO ₂ -Äq	Reduktion Minimum
Wärme	10.762.449	100%	1.188.777	0
Strom	4.253.554	100%	469.830	0
Beton in Stahlbeton	2.961.066	47%	2.530.125	1.569.365
Zement	0	35%	0	0
Aluminium und Nichteisenmetall	1.756.083	69%	1.383.211	551.912
Stahl und Eisen	949.844	68%	749.843	303.950
Ziegel, Fliesen (Keramik)	713.282	70%	558.674	213.984
Kalk	0	30%	0	0
Stahlbewehrung in Beton (rebar)	540.664	68%	426.821	173.013
XPS Isolierung	404.205	0%	404.205	404.205
Bodenausgleich, Zementestrich	343.203	35%	306.008	223.082
Glas	0	84%	0	0
Andere Ressourcen	1.946.054	0%	1.946.054	1.946.054
Summe	24.630.404		9.963.549	5.385.565
/m ² ·a	32,55		13,17	7,12
Reduktion um			59,5%	78,1%
Summe ohne Phase B6	/m ² ·a	12,70	10,97	7,12
Summe Phase A1-A3	/m ² ·a	9,85	8,51	5,52
Reduktion um			13,6%	44,0%

Prognostizierte Emissionen nach Ressourcentyp



Auswertung

REPORT

Bedarf an THG-Emissionen aus dem berechneten Beispiel: **8,51 kg CO₂-Äq./m²·a**

Budget im erwarteten Baujahr 2030: **4,65 kg CO₂-Äq./m²·a**

Das Budget wird überschritten.

Vergleich Bedarf und Budget

Bedarf	8,51
Budget	4,65
Differenz	-3,86

Bericht aus den gewählten Szenarien im Excel-Tool

Handbuch zu Excel-Tool

Handbuch

EXCEL-TOOL

Die folgenden Schritte erklären, wie das Tool zu bedienen ist. Dabei wird grundsätzlich in einem Top-Down-Verfahren ein Budget errechnet, wobei eine Annäherung von der globalen Perspektive durch zunehmende Detaillierung erfolgt. Gegenübergestellt erfolgt die Bewertung eines konkreten Gebäudes, welches mit den Zielen der zuvor definierten Szenarien verglichen wird.

Allgemeine Informationen

Dieses Tool wurde im Rahmen einer Masterarbeit am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München von B.A. Lukas Stöckle erstellt.

Die Arbeit "CO₂-Grenzwertermittlung in der Gebäudezertifizierung auf Basis der ökologischen Tragfähigkeit" wurde von M.Sc. Leander Präger und M.Sc. Jonathan Woytowicz betreut.

Das Tool wird nach APA zitiert als:

Lukas Stöckle. (2024). Tool zur CO₂-Grenzwertermittlung in der Gebäudezertifizierung auf Basis der ökologischen Tragfähigkeit. [Software]. Technische Universität München

Die Datenherkunft innerhalb des Tools ist teilweise verkürzt dargestellt. Die korrekte Referenzierung ist der schriftlichen Arbeit zu entnehmen. Die Berechnung ist im Jahr 2024 möglich, für spätere Jahre sind aktuelle Daten zu ergänzen, um belastbare Resultate zu generieren.

Budgetberechnung

Anhand untenstehender Tabellenblätter wird zwischen den separaten Berechnungsschritten navigiert. Entsprechend dieser Reihenfolge sind die Daten zu befüllen und werden gleichermaßen berechnet.

1 globales Budget	2 nationales Budget	3 Bauaktivität	4 Nutzung	5 CO ₂ -Aspekte
-------------------	---------------------	----------------	-----------	----------------------------

Blau hinterlegte Felder innerhalb der Tabellenblätter sehen eine Dateneingabe vor. Teilweise sind diese durch ein Dropdown-Menü beschränkt, das sich durch einen Klick auf den Pfeil (rechts des jeweiligen Feldes) öffnet. Als Hinweis werden in den nebenstehenden Feldern mögliche Werte vorgegeben, die zur Eingabe freigegeben sind. Eine Erläuterung der Dateneingaben erfolgt unterhalb, wo auch die Nachvollziehbarkeit der Datenherkunft gegeben ist. Bei dem Hinweis auf eine "optionale" Eingabe kann der nebenstehende Referenzwert überschrieben werden

		mögliche Werte	
1,7°C		1,5 - 1,7 - 2	
1,5°C		17 - 33 - 50 - 67 - 83	
1,7°C	Mrd. t CO ₂	% optional	Referenz 40,2%
24.0	2°C	12:50:19	

Sind Felder mit einer violetten Ecke markiert, erscheint bei Mouse-over ein Hinweis zum Eingabefeld, um die Werte und deren Konsequenzen näher zu erläutern.



Wenn Felder mit einer Landkarte markiert sind, werden hinterlegte Daten über die Integration der Suchmaschine Bing direkt synchronisiert und ständig aktualisiert. Die Datenherkunft ist der Bing-Excel-Integration zu entnehmen, da sich Quellen ändern können.

🇩🇪 Deutschland

Handbuch zu Excel-Tool

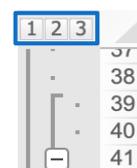
Eingaben werden in den jeweiligen Tabellenblättern ständig visualisiert. Anhand der grafischen Darstellung soll die Plausibilität der eingegebenen Daten überprüft werden.

Gebäudebewertung

Ein konkretes Gebäude wird als gebautes Beispiel oder bereits in der Planung unter dem Tabellenblatt "Gebäudedaten" ausgewertet.



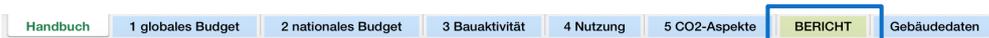
Hier werden Informationen über die Ökobilanz des Gebäudes eingegeben. Außerdem können Suffizienzauswertungen erstellt werden, die jedoch nicht in die Gesamtbewertung und den Bericht einfließen. Für detaillierte Angaben lassen sich in zwei Stufen über die Auswahl 1-3 weitere Felder öffnen. Sind diese eingeklappt, kann die grafische Auswertung beeinflusst werden.



Als Beispiel wird im Tabellenblatt "Goetheschule" gezeigt, wie die komplexe Berechnung mehrerer Bauteile oder separat bilanzierter Gebäudeabschnitte aufgearbeitet wird, um anschließend in die Eingabefelder des Abschnitts Gebäudedaten überführt zu werden.

Bericht

Die vollständige Auswertung wird unter dem Tabellenblatt "BERICHT" zusammengefasst.



Der Bericht umfasst 6 Seiten, die in einer grafischen Darstellung die Berechnungsschritte nachvollziehbar machen und verschiedene Szenarien erläutern.

Der Bericht lässt sich über die Funktion "Datei"->"Drucken" exportieren. (Mac: cmd+p / Win: strg+p)

Folgende Seitenkombinationen sind im Druckdialogfeld möglich:

- Seite 1-2 Budgetberechnung
- Seite 3 Methode
- Seite 4-6 Gebäudebewertung
- Seite 1-6 vollständiger Bericht

Die Auswahl kann über "Druck zu PDF" in der Druckerauswahl oder per Schnellwahl "PDF" an einem definierten Ort gespeichert werden.

