

Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

Quantifizierung der THG-Emissionen am Beispiel eines Entwurfs für die Aufstockung von Mehrfamilienhäusern

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Master of Science (M.Sc.)

an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Betreut von Roland Reitberger, Carsten Schade, Prof. Dr. Werner Lang
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von Elena Maria Kühner

Eingereicht am München, den 07.07.2022

Vereinbarung

zwischen

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

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

– nachfolgend TUM –

und

Frau Elena Maria Kühner

– nachfolgend Autorin/Autor –

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

Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen -
Quantifizierung der THG-Emissionen am Beispiel eines Entwurfs für die Aufstockung
von Mehrfamilienhäusern

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.

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nicht-ausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin versichert, dass sie alleinige Inhaberin 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 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 dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

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

Die Autorin 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 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 einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den

München, den 07.07.2022

.....

.....


(TUM)

(Autorin)

Erklärung

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

München, den 07.07.2022

Ort, Datum, Unterschrift

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kimmus', is written over a horizontal line.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit begleitet und unterstützt haben.

Ganz besonderer Dank geht an meine beiden Betreuer Roland Reitberger und Carsten Schade für regelmäßigen Austausch und inspirierenden Input. Ihre geduldige und verständnisvolle Art der Betreuung und konstruktive Kritik verhalf mir stets motiviert arbeiten zu können. Auch bei Christoph Kurzer, wissenschaftlicher Mitarbeiter des Holzbaulehrstuhls, möchte ich mich für die Unterstützung bei der Detailerstellung bedanken.

Darüber hinaus möchte ich dem Team der Firma Caala sowohl für die Bereitstellung der Ökobilanzsoftware als auch für die Unterstützung bei der Anwendung der Software danken. Mein Dank geht insbesondere an Roman Schulz, Max Hartmann und Margarita Konorova, die mir mit ihrem jeweiligen Expertenwissen aushalfen.

Abschließend möchte ich auch meinen Freunden für den nötigen Ausgleich danken. Besonders dankbar bin ich meiner Familie, die mir das Studieren möglich machten.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kimus', written in a cursive style.

München, den 07.07.2022

Kurzzusammenfassung

Die Herausforderungen des Klimawandels und der gleichzeitig hohe Bedarf an Wohnraum in deutschen, wirtschaftsstarken Regionen stehen in einem Konflikt zueinander, der umgehend zu lösen ist. Die Konstruktion und der Betrieb von Gebäuden ist für 38% aller Emissionen weltweit verantwortlich (UNEP, 2021). Somit kann der Bausektor einen großen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten. Bisher gibt es allerdings kein konkretes Maß, um die Emissionen eines einzelnen Bauprojektes in den Kontext des globalen Geschehens zu stellen. Selbst die Größenordnung, inwieweit der Bausektor innerhalb oder außerhalb noch verfügbarer Treibhausgasemissionen handelt, ist nicht klar.

Mit dieser Arbeit wird eine Verbindung der Emissionen eines konkreten Bauprojektes zum globalen Problem des Klimawandels hergestellt. Dabei soll herausgefunden werden, ob es möglich ist innerhalb eines nationalen Treibhausgasbudgets ausreichend Wohnraum in Deutschland im Allgemeinen, aber insbesondere durch Aufstockung, zu schaffen. Über einen Top-down Ansatz und unter Berücksichtigung des aktuellen Wohnungsbedarfs wird zuerst ein THG-Budget für Wohngebäude definiert. Über den Entwurf einer flächeneffizienten Art des Neubaus, der Aufstockung, wird ein Beispielprojekt für besonders emissionsarmen Wohnraum aufgestellt. Der Bedarf an THG-Emissionen dieser Beispielaufstockung wird daraufhin dem abgeleiteten Budget gegenübergestellt. Somit kann Stellung zur Hypothese genommen werden, dass noch bis 2045 genügend Wohnraum hergestellt werden kann, wenn dieser flächen- und emissionseffizient errichtet ist.

Diese Hypothese wird allerdings mit dem Ergebnis widerlegt, dass selbst bei möglichst emissionsreduziertem Bauen der Wohnraum in Deutschland nur noch 2,4 Jahre betrieben und neuer Wohnraum noch 22,9 Jahre errichtet werden kann. In der Konsequenz bedeutet das, dass für ein 1,5°C-Ziel ab Mitte 2023 alle Wohngebäude klimaneutral betrieben werden müssten und spätestens im Winter 2043 auch die Konstruktion von Wohngebäuden keine Emissionen mehr benötigen dürften.

Als zielführend zur Lösung des Konflikts wird die Entwicklung einheitlicher THG-Budgets und praxisorientierter Benchmarks angesehen. Darüber hinaus muss der Gebäudebestand verstärkt genutzt und alternative Strategien im Wohnungsbau, insbesondere hinsichtlich Kreislauffähigkeit und Suffizienz, verfolgt werden.

Abstract

The challenges of climate change together with the significant demand of living space in Germany's economically strong regions create a conflict which requires an immediate solution. The construction and operation of buildings is responsible for a share of 38% of all emissions worldwide (UNEP, 2021). Therefore, the building sector can make a major contribution in the fight against climate change. So far, however, there is no specific measure to place the emissions of an individual building project in the context of planetary greenhouse gas emission limits. Moreover, even the range of how far the construction sector is within or outside of still available greenhouse gas (GHG) emissions is not clear.

This study establishes a link from the emissions of a specific building project to the global problem of climate change. The aim is to determine whether it is possible in Germany to provide enough living space within the national GHG budget in general, but especially by vertical redensification. In a top-down approach, a GHG budget for residential buildings is first defined with consideration of current housing needs. Vertical redensification is regarded as a highly surface-efficient way to create housing. Thus, by adding an additional floor to a multi-family building, an example project of low-emission housing is created. The required GHG emissions of the example building are then compared with the derived GHG budget. This allows to take a position on the hypothesis that enough housing can still be created until 2045, if it is built in a surface-efficient and low-emission way.

However, the hypothesis is refuted by the result that, even with emission-reduced construction, all housing in Germany can be operated for only 2.4 years and new housing can be built for 22.8 years. Consequently, this means that for a 1,5°C target, all residential buildings would have to be operated climate-neutral from mid 2023 onwards. In addition, by winter 2043 at the latest, the construction of residential buildings should also no longer require any emissions.

To solve the conflict, the development of standardized GHG budgets and practice-oriented benchmarks is seen as the most effective approach. In addition, the existing building stock must be used more intensively as well as alternative strategies in housing construction, especially in terms of circularity and sufficiency.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
Glossar	3
1. Motivation	5
1.1. Zielsetzung, Hypothesen und Forschungsfragen	7
1.2. Aufbau der Arbeit	8
2. Stand der Forschung und Grundlagen	11
2.1. Belastbarkeit des Klimas	11
2.1.1. Klimawandel und Klimamodelle	11
2.1.2. Europäische und nationale Klimaziele	14
2.1.3. Treibhausgas-Budgetierung	16
2.2. Wohnraumbedarf	20
2.2.1. Bevölkerungsentwicklung	20
2.2.2. Trends der Wohnungsnachfrage	22
2.2.3. Wohnungsbedarf	24
2.2.4. Flächenverbrauch und Aufstockungspotenzial	26
2.3. Rahmenbedingungen für Aufstockungen	29
2.3.1. Baurechtliche Anforderungen	29
2.3.2. Baukonstruktive Anforderungen treibhausgasreduzierter Gebäude	30
2.3.3. Merkmale des Bestands	34
2.4. Ökobilanzierung im Bauwesen	36
2.4.1. Allgemeine Grundlagen und Methodik	36
2.4.2. Ökobilanzen für Gebäude	37
2.4.3. Ökobilanzen für Aufstockungen	38
3. Durchführung der Fallstudie	41
3.1. Ableitung eines Treibhausgasbudgets	41
3.2. Baurecht	54
3.2.1. Rahmenbedingungen aus dem Bauplanungsrecht	54
3.2.2. Rahmenbedingungen aus dem Bauordnungsrecht	55
3.3. Baukonstruktion	65
3.3.1. Rahmenbedingungen aus dem Bestand	66
3.3.2. Rahmenbedingungen für die Konstruktion	69
3.4. Entwurf der Aufstockung	82
3.5. Ökobilanzierung der Aufstockung	88
3.5.1. Ziel- und Untersuchungsrahmen	88
3.5.2. Sachbilanz	90

3.5.3. Wirkungsabschätzung der Ökobilanz.....	94
4. Resultat	99
4.1. Gegenüberstellung von THG-Budget und THG-Bedarf	99
5. Diskussion	103
5.1.1. Auswertung des abgeleiteten Treibhausgasbudgets.....	103
5.1.2. Auswertung des Entwurfs und der Ökobilanz.....	107
5.1.3. Grenzen beim Vergleich von THG-Budget und THG-Bedarf	114
6. Fazit und Ausblick.....	121
6.1.1. Zusammenfassung	121
6.1.2. Ausblick	125
Literaturverzeichnis.....	127
Abbildungsverzeichnis	135
Tabellenverzeichnis	137
Anhangsverzeichnis.....	139

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
A _N	Energiebezugsfläche nach DIN V18599-1
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BayBO	Bayrische Bauordnung
BayTB	Bayrische Technische Baubestimmungen
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BNB	Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalent
CRREM	Carbon Risk Real Estate Monitor
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EnEV	Energieeinsparverordnung
EoL	End of Life
EPD	Environmental Product Declaration
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GG	Grundgesetz
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
GWP	Global Warming Potential
IAM	Integrated Assessment Model
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LCA	life-cycle assessment
m ²	Quadratmeter
MHFHHolzR	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise
MHolzBauRL	Muster-Holzbaurichtlinie
NDC	Nationally Determined Contribution
NGF	Nettogrundfläche
PHPP	Passivhaus-Projektierungspaket
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
RCP	Representative Concentration Pathway
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
Abkürzungsverzeichnis	

SSP	Shared Socioeconomic Pathway
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgas
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
V_e	beheiztes Gebäudevolumen
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung

Glossar

Graue Emissionen	Die aus der grauen Energie resultierenden Treibhausgasemissionen. Auf Gebäudeebene bedeuten das Emissionen, die für den Abbau von Baustoffen, den Bau, die Instandhaltung und den Abbruch von Gebäuden und Infrastrukturbauten anfallen.(Weidner et al., 2021)
Graue Energie	„[Als graue Energie wird] die innerhalb der Herstellung verwendete und damit im Material gebundene Energie bezeichnet (...) Sie definiert die Energiemenge, die für Herstellung, Transport, Lagerung sowie Entsorgung eines Produkts benötigt wird.“(Hegger et al., 2007, S. 160)
Klimaneutralität	„Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffemissionen und der Aufnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Kohlenstoffsinken“ (Europäisches Parlament, 2021)
Konstruktion (Handlungsfeld)	Im Kontext des verfügbaren Treibhausgasbudgets bezieht sich der Begriff „Konstruktion“ auf das Handlungsfeld „Herstellung, Errichtung, Modernisierung von Wohngebäuden“. Innerhalb dieser Arbeit wird dieses Handlungsfeld gleichgesetzt mit der Konstruktion bei der THG-Bedarfsberechnung. Im Zusammenhang mit der Ökobilanz der Fallstudie beinhaltet der Begriff „Konstruktion“ daher die Lebensphasen A1-3 und C3+4.
Negative Emissionen	Negative Emissionen sind CO ₂ -Emissionen, die der Atmosphäre mit speziellen Praktiken oder Technologien entnommen werden.(IPCC, 2018)
Nettoreproduktionsrate	Auch Fertilitätsrate. „Durchschnittliche Anzahl von Kindern pro Frau im Verlauf des Lebens. Sie ist ein Maß für die Reproduktionskraft der Bevölkerung“(Sobek & Heinlein, 2022)

Remanenzeffekt

Der Effekt, dass Menschen ab dem 50. Lebensjahr ihre Wohnflächennachfrage nicht mehr erhöhen. Lässt sich ein Umzug beispielsweise in eine Pflegeeinrichtung vermeiden, passen sie ihre Wohnfläche nicht ihrem veränderten Bedarf an. Oft bewohnen diese Menschen somit mehr Wohnfläche als sie benötigen. (Keller, 2012)

Treibhauspotenzial

Auch Global Warming Potential (GWP). „Das Treibhauspotenzial (...) ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag einer chemischen Verbindung zur globalen Erwärmung. Sie gibt an, wie viel eine bestimmte Menge eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Menge Kohlendioxid (CO₂) über einen Zeitraum von hundert Jahren zum Treibhauseffekt beiträgt. Sie wird daher auch als Kohlendioxid-Äquivalent (CO₂-Äquivalent) bezeichnet.“ (BauNetz, 2022b)

1. Motivation

Zahlreiche Kälte- und Hitzewellen, extreme Trockenheit, Starkregenereignisse und untypische Stürme nehmen als Folge der globalen Klimaveränderung zu. In einem Zeitraum von 1880- 2020 stiegen die Jahresdurchschnittstemperaturen in Bodennähe um mehr als 1,2°C an. Damit sind die letzten 30 Jahre die Wärmsten seit mehr als 100.000 Jahren.(UBA, 2022a)

Die Klimakrise und die Tatsache, dass der Temperaturanstieg maßgeblich von anthropogenen Treibhausgasemissionen vorangetrieben wird, fordert eine intensive Auseinandersetzung mit der Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Die Dringlichkeit zu Handeln unterstreicht auch der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in seinen regelmäßigen Berichten. Diese beschreiben welche vielschichtigen und komplexen Folgen eine globale Erwärmung um wenige Grad auf das tägliche Leben und das Ökosystem hat. Zudem werden vom IPCC auf wissenschaftlicher Grundlage globale Kohlenstoffbudgets festgelegt, die die verbleibende Menge an Treibhausgasemissionen für ein bestimmtes Temperaturziel angeben. Auch auf politischer Ebene sind Mechanismen entwickelt, um die Klimaerwärmung einzuschränken. Während sich die Europäische Union mit dem Pariser Abkommen darauf festlegt die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2°C zu begrenzen, verpflichtet sich Deutschland mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) die Klimakrise zu bekämpfen. Das aktuelle KSG verfolgt das Ziel bis 2045 klimaneutral zu sein und die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2030 um 65% und bis 2040 um 88% im Vergleich zum Referenzjahr 1990 zu senken (KSG, 2021).

Gleichzeitig führen Bevölkerungsdynamiken, Urbanisierung und Zuwanderung zu einer enormen Wohnungsknappheit in vielen deutschen Städten und wirtschaftsstarken Regionen (Müller, 2015; Tichelmann et al., 2016). Nicht nur die Deutschlandstudie geht von jährlich 400.000 notwendigen, neuen Wohnungen in Bedarfsregionen aus, sondern auch die deutsche Regierung unterstützt neuen Wohnraum in dieser Größenordnung (Kersting, 2022). Nutzbare Bauflächen für erschwinglichen Wohnraum in Regionen mit Bedarf, wie in städtischen Gebieten, stehen allerdings nur wenige zur Verfügung. Es ist daher notwendig über Nachverdichtung urbane Ressourcen innerhalb der Stadt zur Schaffung von Wohnraum zu nutzen. Auch aus ökologischer Sicht ist die innerstädtische Nachverdichtung sinnvoll, um Flächenversiegelung zu vermeiden und existierende Versorgungsinfrastruktur effizient zu nutzen und auszubauen. (Müller, 2015)

Während auf der einen Seite Treibhausgasemissionen, zum Erhalt der Umwelt, unbedingt verringert werden müssen, soll auf der anderen Seite Wohnraum, der schon heute knapp ist, geschaffen werden. Die Herstellung von Baumaterialien für den Bau und der Betrieb neuer Wohnungen ist aber unweigerlich mit Treibhausgasemissionen verbunden. Nach dem jüngsten Statusreport des United Nations Environment Programme (UNEP) erreichten die energiebedingten CO₂-Emissionen für die Konstruktion und den Betrieb von Gebäuden im Jahr 2019 einen Anteil von 38% aller globalen CO₂-Emissionen (UNEP, 2021). National ist der Gebäudesektor, hinsichtlich Herstellung und Betrieb von Gebäuden, für 28% aller CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich (Bundesregierung, 2022). Aktuelle Studien zeigen, dass trotz der politischen Klimaziele die Fortschritte bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG) im Gebäudesektors jedoch sehr gering sind (Röck et al., 2020). Gebäude stellen demnach eine einflussreiche Stellschraube bei der Senkung der TGH-Emissionen dar.

Um den Konflikt vom Bedarf an Wohnraum bei fortschreitendem Klimawandel anzupacken, benötigt es einer klaren Zielsetzung zur Emissionsreduktion, welche im Bezug zum globalen Kohlenstoffbudget steht. Bisher gibt es allerdings kein einheitliches und konkretes Maß, um den Erfolg oder Misserfolg der Bauwirtschaft als Ganzes und für einzelne Interessensgruppen im Kampf gegen den Klimawandel zu messen. Während ein Werkzeug zur Messbarkeit von THG-Emissionen im Bezug zum globalen Budget fehlt, so muss die Bauwirtschaft unabhängig dieser Entwicklung ihre Emissionen konsequenter als je zuvor einschränken.

Strategien zum emissionsarmen Bauen können rasch umgesetzt werden. Die Entwicklung und rechtskräftige Einigung auf einheitliche, grenzüberschreitend gültige Budgets nimmt jedoch Zeit in Anspruch, die nicht mehr zur Verfügung steht. Diese Arbeit soll deshalb schon jetzt ein ganzheitliches Bild geben, mit welcher Größenordnung der Bau-sektor selbst unter Bestrebungen zur Emissionsreduktion seinen Treibhausgasausstoß einschränken muss, um die globale Erwärmung erfolgreich auf maximal 1,5°C zu begrenzen.

1.1. Zielsetzung, Hypothesen und Forschungsfragen

Mit dieser Arbeit soll herausgefunden werden, ob es möglich ist innerhalb eines nationalen Treibhausgasbudgets Wohnraum im Allgemeinen, aber insbesondere durch Aufstockung, in ausreichender Anzahl in Deutschland zu schaffen. Es soll ein holistisches Bild aufgespannt werden, welches die Verbindung vom einzelnen Projekt zum globalen Problem des Klimawandels herstellt. Mit dem Entwurf an einem konkreten Objekt sollen gleichzeitig Handlungsmöglichkeiten in der Ausgestaltung von emissionsarmen Aufstockungen in Bedarfsregionen aufgezeigt werden. Im Wesentlichen soll dabei die Größenordnung der Differenz von Budget zu Bedarf herausgearbeitet werden, um die Dringlichkeit neuer Reduktionsansätze im Bausektor und die Notwendigkeit klarer Kommunikation von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft deutlich zu machen.

Die folgenden, aufeinander aufbauenden Forschungsfragen führen durch ihre jeweilige Beantwortung, zu dem benötigten Wissen, um die Kernfrage zu beantworten und Stellung zur Hypothese zu beziehen.

F1: Wie viele Treibhausgasemissionen des globalen Emissionsbudgets werden dem deutschen Bausektor zugeschrieben?

F2: Wie viel Wohnraum wird in Deutschland benötigt und wie hoch ist das Potenzial diesen durch Aufstockungen zu decken?

F3: Welche konstruktiven Kriterien bestimmen den CO₂-Fußabdruck von Wohnraum, insbesondere von Aufstockungen, maßgeblich und wie werden diese nach heutigem Stand der Technik ausgeführt?

F4: Wie viele Treibhausgase werden bei emissionsoptimierter Konstruktion pro Quadratmeter Nettogrundfläche durch Aufstockungen emittiert?

Kernfrage:

Wie lange ist es noch möglich innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets ausreichend Wohnraum, insbesondere durch Aufstockungen, in Deutschland zu schaffen?

Hypothese:

Bei flächen- und emissionseffizienter Wohnraumerweiterung kann, bis zur politisch angestrebten Klimaneutralität im Jahr 2045, ausreichend Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgas-Budgets hergestellt werden.

1.2. Aufbau der Arbeit

Der Grundlagenteil spannt den Rahmen auf in welchem sich die Untersuchung der Arbeit bewegt. Um ein Budget definieren zu können, wird zuerst festgestellt, wie belastbar das Klima ist (Kapitel 2.1), welche Klimaziele im Detail angestrebt werden und welche Lösungen die Wissenschaft schon für die Definition eines Treibhausgasbudgets für das Wohnen bereithält. Auf Gebäudeebene hängt das Budget maßgeblich davon ab, auf wie viel benötigten Wohnraum es aufgeteilt werden muss. Im Unterkapitel 2.2 wird daher eine Analyse zur aktuellen, nationalen Bevölkerungsdynamik und dem resultierenden Wohnraumbedarf durchgeführt. Im Unterkapitel 2.3 werden die rechtlichen und konstruktiven Grundlagen und gesetzlichen Rahmenwerke gesammelt und mit Hilfe der Literatur eine Strategie zum emissionsarmen Bauen aufgestellt. Die baurechtlichen und baukonstruktiven Rahmenbedingungen bilden später die Grundlage für den Entwurf der Beispielaufstockung. Um die Treibhausgasemissionen des Fallbeispiels quantifizieren zu können, wird im letzten Unterkapitel der Grundlagenermittlung auf die Grundlagen und die Methode von Ökobilanzen für Aufstockungen eingegangen.

Den Hauptteil der Arbeit bildet die Ableitung von Treibhausgasbudgets für das Wohnen, die Entwicklung eines emissionsoptimierten Entwurfs und abschließend die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen dieser Aufstockung durch eine Ökobilanzierung. Es wird nach der Reihenfolge aus der Grundlagenermittlung vorgegangen. Im Unterkapitel 3.1 wird das Treibhausgasbudget, vom globalen Budget ausgehend, immer weiter differenziert. Auf nationaler und tätigkeitsspezifischer Ebene kann es schließlich auf den Wohnraumbedarf aufgeteilt werden. Auch der Entwurf nähert sich von Abwägungen, die den großen Maßstab betreffen, an immer spezifischere Entscheidungen an. Um Anforderungen an den Entwurf aufzustellen, wird daher in Unterkapitel 3.2 und 3.3 für jede Entscheidung zuerst der Handlungsspielraum diskutiert. Auf Grundlage dieser Rahmenbedingungen wird im Kapitel 3.4 der Entwurf für eine beispielhafte Aufstockung bis auf Detailebene in Planzeichnungen umgesetzt. Durch die Untersuchung der Entwurfsparameter kann, ein Vorschlag für einen baurechtlich umsetzbaren, möglichst emissionsarmen Wohnraum gemacht werden. Im nächsten Schritt werden über die Ökobilanzierung im Kapitel 3.5 die Treibhausgasemissionen der vorgeschlagenen Aufstockung quantifiziert. So wird bestimmt, wo sich die untere Grenze befindet, bis zu welcher es heute möglich ist Wohnraum zu schaffen.

Das Ergebnis der Arbeit im Kapitel 4 beantwortet mit der Gegenüberstellung des abgeleiteten THG-Budgets und dem ermittelten Bedarf aus der Fallstudie schließlich die Kernfrage. Alle Variablen, die dieses Ergebnis einschränken sind im darauffolgenden Kapitel, der Diskussion, ausführlich beschrieben.

Den Abschluss der Arbeit bildet das Fazit. Es ist die Schlussfolgerung aus den Untersuchungen und dessen Grenzen der Anwendbarkeit. Mit dem Ausblick wird aufgezeigt, wo, im Anschluss an diese Arbeit, noch Forschungsbedarf nötig ist, um effektiv im Kampf gegen den Klimawandel handeln zu können.

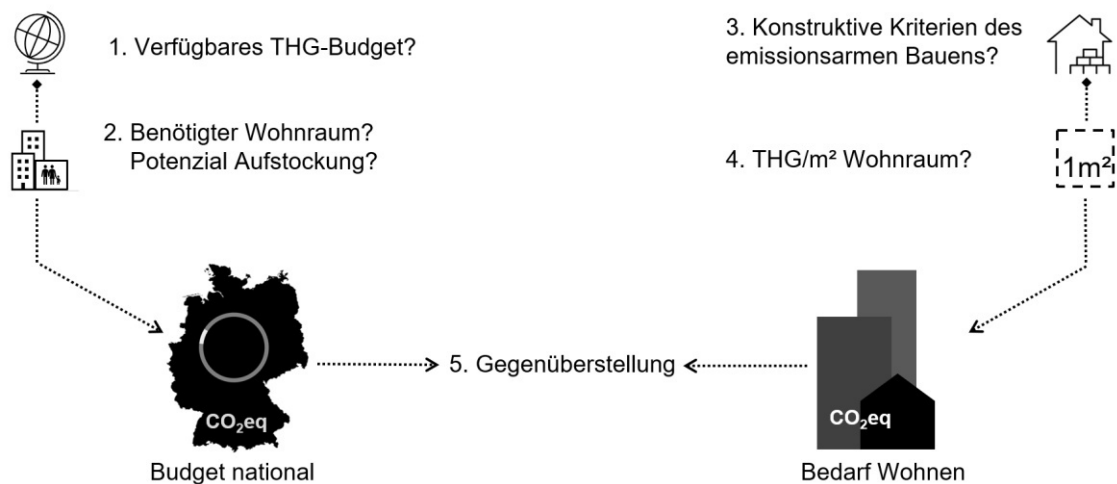


Abbildung 1: Methodik zur Beantwortung der Forschungsfrage (eigene Darstellung)

2. Stand der Forschung und Grundlagen

Zum Beweis oder der Widerlegung der Hypothese dieser Arbeit und zur Beantwortung der Forschungsfrage, wie lange ein verfügbares, nationales Treibhausgasbudget für die Schaffung von Wohnraum ausreicht, werden aktuelle Informationen aus sehr unterschiedlichen Fachgebieten benötigt. Das folgende Kapitel definiert daher den Gesamtkontext dieser Arbeit und zeigt neben dem aktuellen Stand der Forschung je Themengebiet Anknüpfungspunkte für die folgenden Untersuchungen auf.

2.1. Belastbarkeit des Klimas

Dieses Unterkapitel führt an die Definition eines Treibhausgasbudgets innerhalb dieser Arbeit heran. Da der Klimawandel und die anthropogenen Treibhausgasemissionen unweigerlich miteinander verbunden sind, wird zuerst beleuchtet, wie belastbar das Klima aus Sicht der Wissenschaft noch ist und welche Klimaziele demzufolge angestrebt werden. Um sichtbar machen zu können, ob ein Klimaziel zu erreicht werden kann, hat die Forschung unterschiedliche Methoden entwickelt spezifische Treibhausgasbudgets für ein Handlungsfeld abzuleiten. Diese werden am Ende des Unterkapitels erläutert und bilden die Grundlage des Treibhausgasbudgets für Wohnraum in dieser Arbeit.

2.1.1. Klimawandel und Klimamodelle

Einen natürlichen Klimawandel, mit kleineren und größeren Temperaturschwankungen, gibt es seit jeher. Das zeigt das internationale Komitee für Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erstmals im dritten Sachstandsbericht mit der in Abbildung 2 dargestellten Temperaturkurve auf. Wie zahlreiche, unabhängige Studien daraufhin bestätigten, kündigte der exponentielle Temperaturanstieg des 20ten Jahrhunderts die heute wärmsten Jahre des letzten Jahrtausends an (Klimafakten, 2015). Analog zum Temperaturanstieg entwickelte sich das Bevölkerungswachstum und mit ihr die anthropogenen CO₂-Emissionen. Der Temperaturanstieg und damit der Klimawandel wird maßgeblich vom Treibhausgasemissionen vorangetrieben. Dabei stellt Kohlenstoffdioxid das Gas dar, welches quantitativ den größten Anteil aller Treibhausgase hat. Als Hauptantreiber des Treibhausgasemissionen wird Kohlenstoffdioxid daher als Referenzgas für das Treibhausgasemissionen herangezogen. Die Effekte, die durch den Treibhauseffekt verursachten Erderwärmung, zeigen sich durch vermehrt extreme

Wetterereignisse, dem Schmelzen der Polkappen und dem gleichzeitigen Anstieg der Meeresspiegel. Nicht nur menschengemachte Emissionen in die Atmosphäre, den Boden und in die Gewässer, sondern auch die Art der Landnutzung und der Umgang mit natürlichen Ressourcen treiben den Klimawandel weiter an. Die Belastung der Ökosysteme, sinkende Trinkwasserressourcen und die soziale Ungleichheit werden sich, bei aktuellen Klimaentwicklungen, weiter verstärken.(Ebert, 2019)

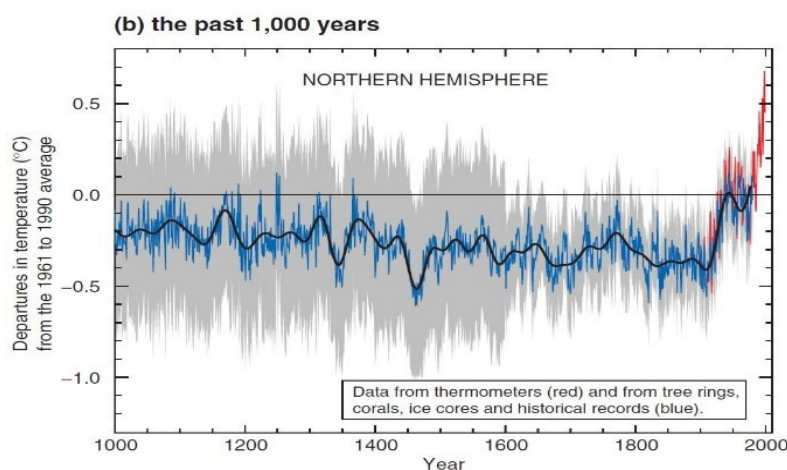


Abbildung 2: Temperaturentwicklung der letzten 1000 Jahre aus dem dritten Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2001, S. 3)

Dass die Temperaturen bei angenommenen Entwicklungen auch in der Zukunft steigen, machen die regelmäßigen Sachstandsberichte des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung, IPCC, deutlich. Ein Gremium an internationalen Wissenschaftlern tragen in diesen Berichten ihre Erkenntnisse zur Klimaforschung zusammen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Klimamodelle, die auf der Grundlage von Szenarien, mögliche Klimaprojektionen modellieren. Die, seit dem fünften Sachstandsbericht definierten, Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCPs), wurden auf der Entwicklung dieser Szenarien entwickelt. Für sie wurden in Bewertungsmodellen, den so genannten IAMs (Integrated Assessment Models), Annahmen zum Einfluss von demografischen, ökonomischen, ökologischen und technologischen Entwicklungen auf den Strahlungshaushalt bzw. den Energiehaushalt der Erde, getroffen. Die hergeleiteten Klimaszenarien ermöglichten dem IPCC je vier Konzentrationspfade für Treibhausgasemissionen, Treibhausgaskonzentrationen, für anderen Emissionen in die Atmosphäre und für die Landnutzung zu entwickeln. Die Pfade quantifizieren demnach messbare Indikatoren für den Klimawandel. Mit Hilfe dieser Pfade können so Auswirkungen auf das Klima und mögliche Anpassungen auf Klimaänderungen bewertet werden. Ausblicke in die Zukunft schließen allerdings immer Unsicherheiten ein. Diese

liegen in unvorhersehbaren Wetter- und Umweltereignissen, wie Vulkanausbrüchen, aber auch in begrenzten Daten- und Rechenkapazitäten oder nicht kalkulierbaren, dynamischen, ökonomischen, sozialen und technologischen Entwicklungen. Die Klimamodelle und Klimaprojektionen sind also immer als eine mögliche Entwicklung mit einer Spannweite an Ergebnissen, statt einer Prognose des Zukunftsklimas zu verstehen. (DWD, 2021; UBA, 2021a)

Auf Grundlage der RCPs aus dem fünften Sachstandsbericht werden im jüngsten Sachstandsbericht, sozialökonomische Entwicklungspfade, die Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), definiert. Diese rücken die gesellschaftliche Entwicklung in den Vordergrund und definieren so fünf sozioökonomische Entwicklungspfade. Die beiden Entwicklungspfade, SSP1-1.9 und SSP1-2.6 (vgl. Abb. 3), entsprechen den Zielen des Pariser Klimaabkommens, die Erderwärmung bis 2100 auf 1,5°C bzw. 2°C zu beschränken. (DWD, 2021; Kasang, 2020)

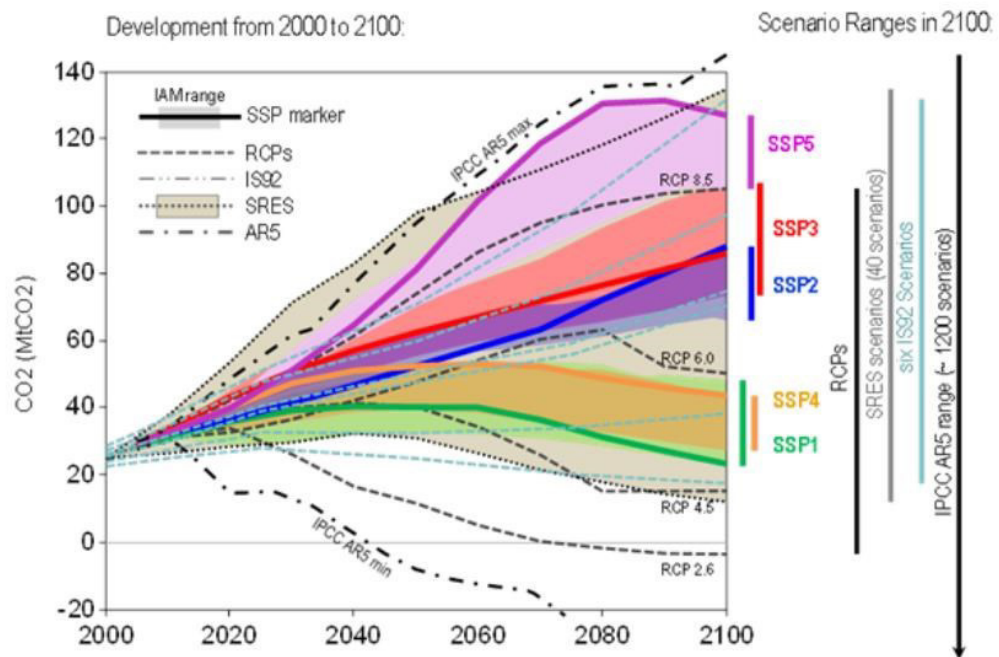


Abbildung 3: Die sozioökonomische Entwicklungspfade des IPCC (UNFCCC, o.D.)

2.1.2. Europäische und nationale Klimaziele

Die zukünftige Entwicklung des Klimas ist in besonderem Maße davon abhängig, was wir als Bevölkerung dagegen unternehmen, den menschengemachten Klimawandel umzukehren. Die im folgenden vorgestellten Ziele verdeutlichen vergangene und aktuelle Bestrebungen den Klimawandel einzugrenzen. Es wird herausgearbeitet auf welcher Grundlage und mit welchem Prinzip offizielle Klimaziele aufgestellt sind und wie sie konkret definiert werden. Ihre Stichhaltigkeit gibt Aufschluss darüber, welches Emissionsziel sich für das Treibhausgasbudget aus dieser Arbeit eignet.

Klimarahmenkonvention

Mit dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), der Klimarahmenkonvention, wurde 1994 der Weg für die Zusammenarbeit der Mitgliedsländer zum Klimaschutz geebnet. Inzwischen haben 197 Staaten, und damit fast alle Länder der Welt den Klimarahmenvertrag unterzeichnet. Das Ziel ist es, die Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre so niedrig zu halten, dass „eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“ (UNFCCC, 1992, Artikel 2). Der Rahmenvertrag legt die Grundstruktur der Zusammenarbeit der Länder, gemäß einer „gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortung und ihren jeweiligen Fähigkeiten“ (UNFCCC, 1992, Artikel 3) im Kampf gegen den Klimawandel, fest. In regelmäßigen Abständen sind die Mitgliedsländer verpflichtet dem Sekretariat einen Bericht über nationale, anthropogene Emissionen und geplante oder schon durchgeführte Maßnahmen und deren mögliche Auswirkungen einzureichen. Konkrete Klimaschutzziele enthält der Rahmenvertrag allerdings keine. (Buhofer, 2021, S. 133; UNFCCC, 1992)

Kyoto-Protokoll

Ein erster Zielrichtwert für die internationale Klimapolitik wurde 1997 auf der UNFCCC-Konferenz in Kyoto mit dem in Krafttreten des Kyoto-Protokolls festgeschrieben. Die Annex-I-Staaten, Industrieländer, die als größte Verursacher von Treibhausgasen gelten, verpflichten sich durch das Protokoll zu einer Begrenzung der Emissionen. Alle anderen Mitgliedsstaaten spielen im Kyoto-Protokoll nur indirekt eine Rolle. Allerdings schließt das Kyoto-Protokoll zwei große Problematiken ein. Kritisch ist, dass sich die Emissionen nur auf die Produktionen im Land konzentrieren. Emissionen, die allerdings durch den Konsum von im Ausland produzierten Gütern entstehen, werden nicht

berücksichtigt. Das wird begründet in der Annahme, dass emissionsarme Exporte, emissionsreiche Importe ausgleichen. Eine weitere Problematik stellt die Bedeutung der Länder aus dem Kyoto-Protokoll am Klimawandel im globalen Vergleich dar. Waren die Mitgliedsländer 1990 noch für 33% der weltweiten Emissionen verantwortlich, so belief sich deren Anteil im Jahr 2012 auf nur noch 20% im weltweiten Vergleich. Wenn nur das Kyoto-Protokoll umgesetzt werden würde, könnten die jährlichen, weltweiten Emissionen um nur 0,9% reduziert werden. (Buhofer, 2021, S. 138–152)

Pariser Übereinkommen

Während des zweiten Verpflichtungszeitraums aus dem Kyoto-Protokoll, wurde 2015, auf der internationalen Klimakonferenz, das Übereinkommen von Paris verabschiedet. Das auf Basis der Klimakonvention entstandene Pariser Übereinkommen löste das Kyoto-Protokoll bis Ende 2020 vollständig ab. Das gemeinschaftliche Ziel des Abkommens lautet, den Kohlenstoffausstoß „so schnell wie möglich“ zu reduzieren, um die globale Erwärmung auf „deutlich unter 2°C“, wenn möglich auf 1,5°C zu begrenzen. Alle Länder der Klimarahmenkonvention nehmen am Abkommen von Paris teil und übernehmen so individuelle Emissionsziele. Es kann also eine viel größere, geografische Reichweite als im Kyoto-Protokoll erzielt werden. Statt eines Top-down Ansatzes aus dem Kyoto-Protokoll wird nun eine Bottom-up Strategie verfolgt. Statt Klimaschutzbeträge zentral in konkreten, prozentualen Reduktionszielen festzulegen, legt nun jeder Staat dem UNFCCC-Sekretariat national festgelegte Beiträge (Nationally Determined Contributions, NDCs) vor. Ab 2020 findet alle fünf Jahre eine Bestandsaufnahme statt, die überprüfen soll, ob die Ziele erreicht wurden. Allerdings werden keine Sanktionsmaßnahmen definiert, wenn selbst gesetzte Ziele nicht eingehalten werden. (Buhofer, 2021, S. 152–156)

Klimaschutzgesetz Deutschland

Um die Zielsetzungen aus dem Übereinkommen von Paris zu erreichen, hat sich Deutschland, nach dem neuen Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom August 2021, zum Ziel gesetzt, bis 2030 seine Treibhausgasemissionen um 65% im Vergleich zum Niveau von 1990 zu reduzieren. Bis 2045 soll eine Netto-Treibhausneutralität erreicht und bis 2050 sogar negative Emissionen erzielt werden. Neben den prozentualen Minderungszielen legt das KSG in Anlage 2 zu §4 zulässige Jahresemissionsmengen, für die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und sonstiges fest. Nachstehende Abbildung 4 verdeutlicht die bisherigen

Entwicklungen und Zielfestlegungen für die einzelnen Sektoren aus dem KSG. (UBA, 2021c)

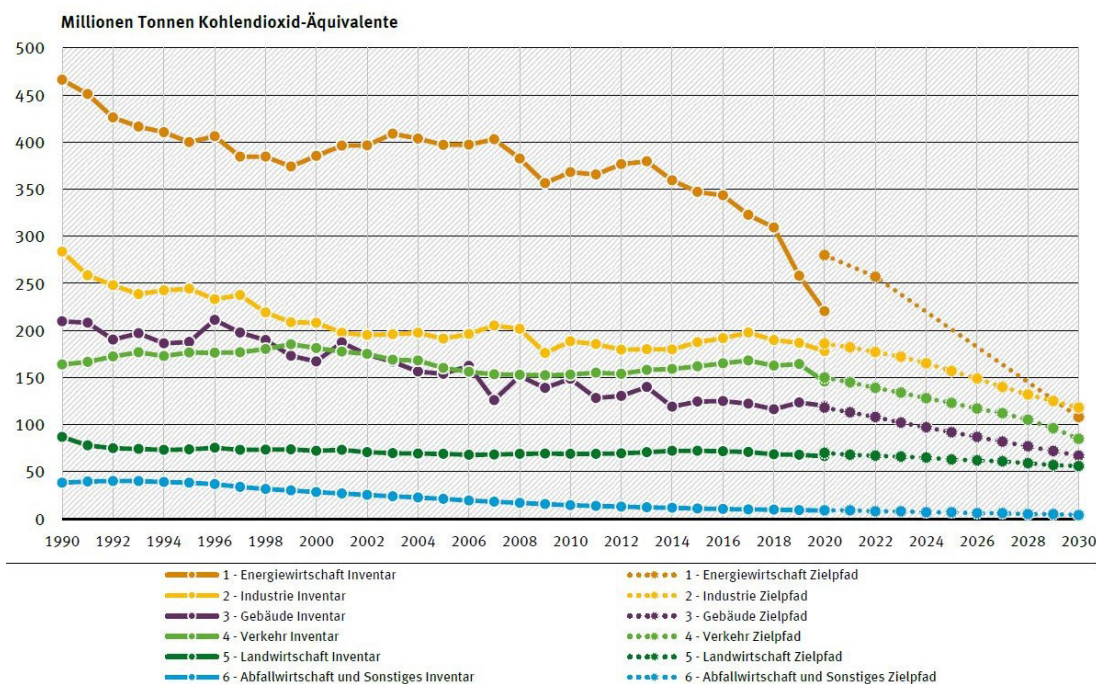


Abbildung 4: Treibhausgasminderungsziele Deutschland (UBA, 2021c)

Doch selbst wenn die national festgelegten Beiträge der Länder, wie in Deutschland im KSG verankert, eingehalten werden würden, kommt der IPCC zum Schluss, dass das Ziel aus dem Pariser Klimaabkommen nicht eingehalten werden kann (IPCC, 2019, S. 357). An diesen Umstand wird bei der Ableitung des Treibhausgasbudgets für das Wohnen angeknüpft, indem verbleibenden Emissionsbudgets von wissenschaftlich und politisch motivierten Zielen gegenübergestellt werden.

2.1.3. Treibhausgas-Budgetierung

Neben den Zielen für ein globales Gesamtbudget an Treibhausgasemissionen werden noch zusätzliche Annahmen zur Allokation der Emissionen benötigt. Nur so kann ein Emissionsbudget definiert werden, welches mit den tatsächlichen Treibhausgasemissionen von Wohngebäuden in Relation gesetzt werden kann. Insbesondere die Methodik von Priore et al. (2021) für ein Emissionsbudget für die Schweizer Bauwirtschaft wurde in dieser Thesis aufgegriffen. Darüber hinaus beschreiben Habert et al. (2020) im Detail verschiedene Herangehensweisen zur Festlegung eines

Treibhausgasbudgets für die Bauwirtschaft und die aus verschiedenen Annahmen entstehenden Konflikte.

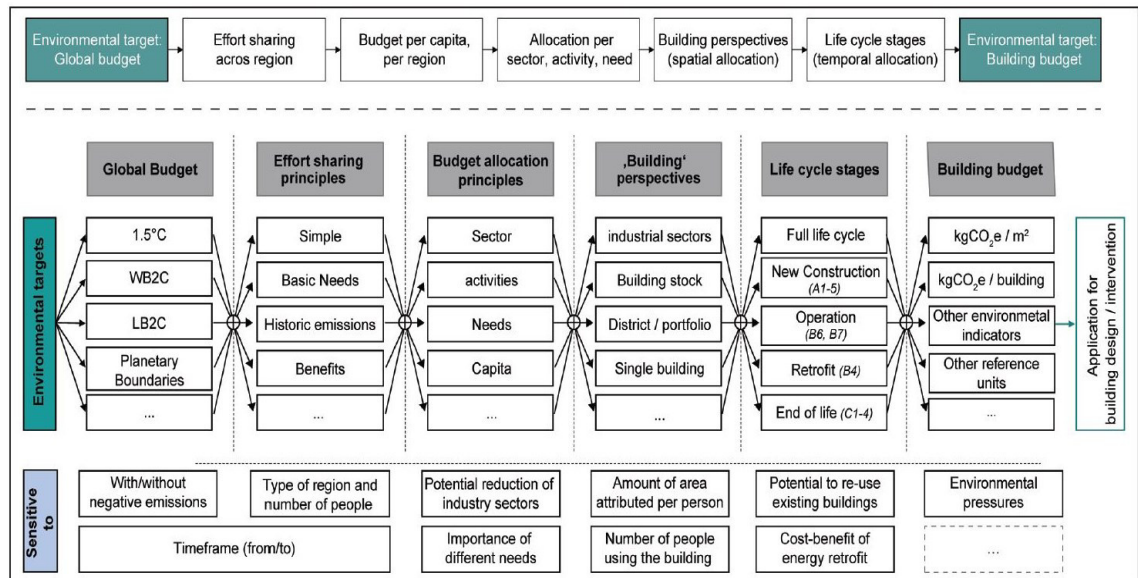


Abbildung 5: Methodik zur Ableitung eines Treibhausgasbudgets für Gebäude (Habert et al., 2020, 438, Figure 3)

Habert et al. (2020) entwickeln auf Grundlage mehrerer, aktueller Studien, hauptsächlich aus Europa, eine Entscheidungsmatrix, die das Vorgehen zur Ableitung eines Treibhausgasbudgets zusammenfassend darstellt (vgl. Abb.5). Ausgehend von einem globalen Budget, verringert sich das Budget nach einer ausgewählten Verteilregel für das betrachtete Land. Daraufhin teilt sich das berechnete, nationale Budget je nach Bewertungsgegenstand erneut auf. Habert et al. (2020) halten beispielsweise eine Verteilung nach Tätigkeitsbereich, wie z. B. Gebäude, nach Bedarfsbereich, wie z.B. dem Wohnen oder nach Aufteilung auf Wirtschaftssektoren für sinnvoll. Priore et al. (2021) aber auch der BBSR (2020) teilen dementsprechend nach Wirtschaftssektoren in Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr, Abfall und Sonstiges auf. Zur Betrachtung eines Systems, hier der Wohnungsbauwirtschaft, werden nun alle Stoffströme für das System über sektorale Anteile abgeleitet. Wenn beispielsweise der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet werden soll, ist es wichtig sowohl direkte Emissionen als auch vorgelagerte und indirekte Emissionen zu betrachten. Direkte Emissionen sind unter anderem Emissionen, die im Gebäudebetrieb anfallen. Vorgelagerte Emissionen können aus der Bereitstellung der Energiequellen stammen, während indirekte Emissionen alle vor- und nachgelagerten Aktivitäten, inklusive der Herstellung und Verarbeitung von Baumaterialien, dem Bau, der Instandhaltung, Ersatz, Renovierung und Abriss des Gebäudes beinhalten. (Habert et al., 2020) Das betrachtete System wird weiter aufgeteilt in

Handlungsfelder, Lebensphasen und schließlich die gewünschte Einheit. Je Allokationsphase gibt es eine Bandbreite an Annahmemöglichkeiten. Das macht den Vergleich verschiedener Treibhausgasbudgets untereinander aber auch den Vergleich zum Emissionsbedarf eines Betrachtungssystems schwer. Beispielsweise hängt das globale Budget im Wesentlichen von der Wahl der literarischen Quelle, gleich zu Anfang der Entscheidungsmatrix, ab. Die Bezugsquelle entscheidet über welchen Zeitraum das Budget aufgestellt wird, welches Ziel mit welcher Wahrscheinlichkeit erreicht und ob negative Emissionen mitbetrachtet werden oder nicht. Während für ein 1,5°C-Ziel nach Millar et al. (2017), zitiert aus Habert et al. (2020), ab 2020 noch 500 GtCO₂eq zur Verfügung stehen, geht der CRREM auf Basis von Rockström et al. (2009) von einem Budget von 669 GtCO₂eq ab 2019 aus. Der Umweltbundesrat (2021) verwendet hingegen ein globales Maximalbudget von 800 GtCO₂eq ab 2018 und verfolgt ein 1,75°C-Ziel.

Herunterskaliert auf den Gebäudesektor unterscheiden sich die Ergebnisse für Emissions-Grenzwerte, je nach Aufteilungskriterien, um den Faktor 10 (Habert et al., 2020, S. 442). Während Zimmermann et al. (2005) ein Budget von 12 kgCO₂eq/m²a für Graue Emissionen und Betriebsemissionen für Einfamilienhäuser definieren, kommen Hollberg et al. (2019) auf 6 kgCO₂eq/m²a, Breinjord et al. (2017) auf 0,67-8,8 kgCO₂eq/m²a, Hoxha et al. (2020) auf 5,8 kgCO₂eq/m²a und Pálenský & Lupíšek (2019) auf 16,5-26,8 kgCO₂eq/m²a. Grund hierfür sind unterschiedliche Annahmen für das anfängliche Globale Budget, andere Regeln zur Allokation für ein nationales Budget, sowie eine andere Bezugsfläche für den durchschnittlichen Wohnflächenbedarf. Zum Teil werden andere Lebenszyklusphasen betrachtet, aber auch der Betrachtungszeitraum weicht von 50 bis 120 Jahren stark voneinander ab.

Unabhängig von den Differenzen je nach Ableitungsmethodik ist für Deutschland noch kein lebenszyklusumfassendes Treibhausgasbudget für den Gebäudesektor entwickelt. Zwar ermittelt der Umweltbundesrat (2021) ein nationales Emissionsbudget für ein 1,5°C-Ziel, dieses ist aber nicht auf den Gebäudesektor differenziert. Ein ähnliches Konzept, neben der Definition eines konkreten Treibhausgasbudgets für den Gebäudesektor, verfolgt auch ein europäisches Forschungsprojekt mit dem Carbon Risk Real Estate Monitor (CRREM). Ziel ist es mit dem CRREM Tool herauszufinden inwieweit Maßnahmen, die den CO₂-Bedarf eines Gebäudes minimieren ausreichen, um die EU-Klimaziele und damit die Ziele des Pariser Abkommens zu erfüllen. Ähnlich wie in dieser Arbeit definiert das Forschungsprojekt Zielpfade, differenziert nach Land und

Gebäudenutzung, die mit den Zielen für eine maximale Erderwärmung um 1,5°C bzw. 2°C übereinstimmen. Mit Hilfe einer Emissionskurve stellt der CRREM dar, ab wann das spezifische Gebäude, die für diesen Gebäudetyp noch verbleibenden Emissionen im Betrieb übersteigt. Mit Hilfe des Tools ist es außerdem möglich die Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen auf der Emissionskurve darzustellen. Allerdings berücksichtigt die CRREM-Kurve nur den betrieblichen Energieverbrauch. Die Grauen Emissionen des Gebäudes, abseits der Sanierungsmaßnahme, sind nicht betrachtet. Auch Wohngebäude sind nicht im CRREM-Tool integriert.

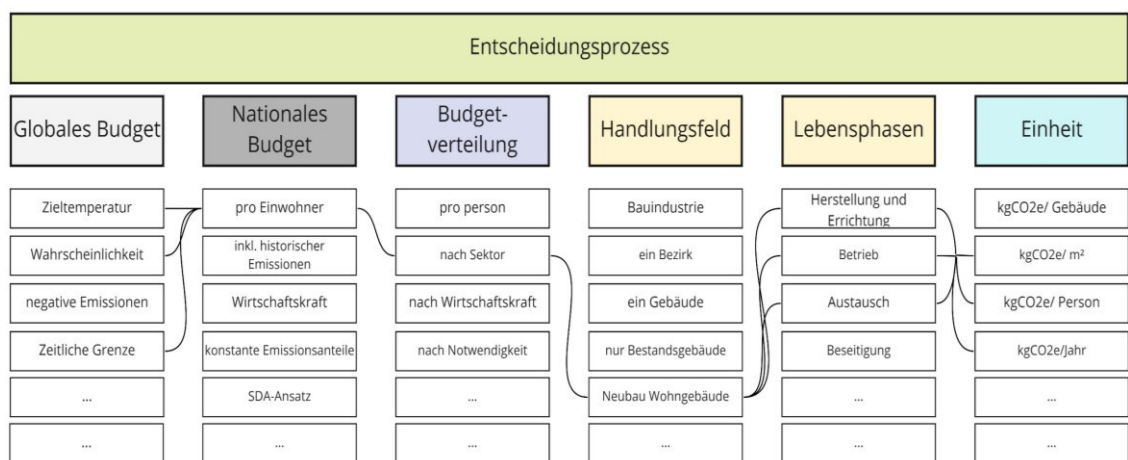


Abbildung 6: Entscheidungsmatrix für die Ableitung eines Treibhausgasbudgets für die Konstruktion und den Betrieb von Wohngebäuden in Deutschland (eigene Darstellung)

Die schon definierten Treibhausgasbudgets aus der Literatur können aufgrund der hier dargestellten abweichenden Ziele, Allokationsregeln und Systemgrenzen, nicht dem benötigten Emissionsbedarf der Fallstudie gegenübergestellt werden. Zur Beantwortung der Forschungsfrage muss daher ein eigenes Treibhausgasbudget für die Konstruktion und den Betrieb des deutschen Wohnungsmarktes abgeleitet werden. Die Entscheidungsmatrix zu Annahmen für ein Treibhausgasbudget für deutsche Wohngebäude ist in dieser Arbeit angelehnt an Habert et al. (2020) und Priore et al. (2021), wie Abbildung 6 verdeutlicht. Die Auswahl und einzelnen Schritte bis zum aufgestellten Budget sind in Kapitel 3.1 genauer beschrieben.

2.2. Wohnraumbedarf

Die Bevölkerungsentwicklung und damit zusammenhängende Wandlungen am deutschen Wohnungsmarkt geben Rückschlüsse auf den zu erwartenden Wohnflächenbedarf. Der Bedarf an zusätzlich benötigter Wohnfläche ist eine wichtige Größe für die Einschätzung wie lange das verfügbare Treibhausgasbudget für den Wohnungsbau noch ausreicht. Für die Formulierung eines Treibhausgasbudgets pro Quadratmeter (m²) spielen insbesondere die erwartete Wohnungsnachfrage, sowie der Flächenbedarf pro Wohnung eine Rolle. Vor dem Hintergrund Treibhausgasemissionen wo möglich einzusparen, wird außerdem beleuchtet, wie groß das Potenzial ist, durch Aufstockungen Wohnraum in Deutschland zu schaffen.

2.2.1. Bevölkerungsentwicklung

Weltweit hat sich die Größe der Weltbevölkerung innerhalb der letzten 250 Jahre verdreifacht. Die durchschnittliche Anzahl von Kindern pro Frau, die Nettofortpflanzungsrate, lässt dagegen eine in der Zukunft weniger stark wachsende Bevölkerung vermuten. Sobek & Heinlein (2022, S. 22–26) machen deutlich, dass sich die Nettofortpflanzungsrate von 4 im Jahr 1997, auf 2,6 im Jahr 2010, bis heute fast halbiert hat. Sie heben noch dazu hervor, dass für eine konstante Bevölkerungszahl die Nettofortpflanzungsrate bei 2,1 liegen sollte und Deutschland diese mit der Zeit 1,54 unterschreitet (Stand 2020). Neben dieser biologischen Reproduktionszahl spielt aber auch die soziale Reproduktion eine entscheidende Rolle in der Bevölkerungsentwicklung. Gemeint ist damit das „Verhältnis von Zuwanderung zu Abwanderung zur Gesamtbevölkerungszahl“ (Sobek & Heinlein, 2022, S. 25). Von 2011 bis 2015 sind in Deutschland gleichzeitig 0,81 Mio. Menschen emigriert und 1,37 Mio. Menschen eingewandert. Hauptgründe für die Immigration nach Deutschland sind politische Konflikte und Verfolgung, eine bessere Gesundheitsversorgung, Zugang zu Bildung und allgemeiner Wohlstand sowie der Klimawandel. Insbesondere den Klimawandel sehen Sobek und Heinlein als einen der zukünftigen Hauptgründe für Wanderungsbewegungen. (Sobek & Heinlein, 2022, S. 22–26)

Müller (2015, S. 13–16) unterscheidet die Bevölkerungsentwicklung in die natürliche Bevölkerungsentwicklung, Zu- und Abwanderungen und in landesinterne Wanderungen. So übersteigen die Sterbefälle die Geburten im Jahr 2012, aus der Veröffentlichung von Müller (2015). Ein ähnliches Verhältnis ist aber auch für das Jahr 2021 mit 1,02 Mio. Sterbefälle zu 0,8 Mio. Geburten, zu beobachten (Statista, 2022a). Die natürliche

Bevölkerungsentwicklung ist demnach rückläufig. Bevölkerungsgewinne sind hauptsächlich aus Einwanderungen nach Deutschland zu verzeichnen. Die aktuelle Deutschlandstudie aus dem Jahr 2019 geht zwar von einem mittelfristigen Wanderungsgewinn von 300.000 Personen pro Jahr aus, unterstreicht aber die hohe Varianz des tatsächlichen Bevölkerungsgewinns (Tichelmann et al., 2019). So sind in den Jahren 2016 und 2017 statt prognostizierter 600.000 Personen 900.000 Personen pro Jahr hinzugekommen (Tichelmann et al., 2019, S. 17). Interessant ist die Beobachtung von Müller (2015, S. 13–16), dass sich die Gesellschaft verjüngt, da die auswandernde Bevölkerung generell älter ist, als die zuziehenden Menschen. Einen besonders großen Einfluss auf den aktuellen Wohnraumbedarf haben auch Wanderungsbewegungen zwischen den Bundesländern und innerhalb der Länder. Hauptsächlich Umzugsgründe sind wirtschaftliche Faktoren, wie bessere Arbeitsplätze, aber auch das Angebot von Studien- und Ausbildungsplätzen sowie Dienstleistungsangebote spielen eine Rolle. So verzeichnen vor allem die alten Bundesländer laut aktueller Bevölkerungsprognose des BBSR (2021a), einen Zuwachs an Einwohner, steigende Geburten und damit eine jüngere Gesellschaft. Aus den neuen Ländern und strukturschwachen Landkreisen wandern vor allem junge Menschen in Großstädte und wirtschaftsstarke Regionen ab, womit dort der Leerstand und das Durchschnittsalter steigt. Neben der Binnenwanderung, und diese verstärkend, lässt sich auch ein Trend zum Wohnen in der Stadt beobachten. Während wachsende Kreise und Großstädte urbane Ressourcen effektiv nutzen müssen, sind schrumpfende Gemeinden darauf angewiesen öffentliche Dienstleistungen und Infrastruktur aufrechtzuerhalten und den Rückbau nicht benötigter Wohnungen zu diskutieren. (Müller, 2015, S. 13–16)

Zusammenfassend kann von einer sinkenden Bevölkerungszahl in Deutschland ausgegangen werden, allerdings von einem deutlich geringeren Rückgang als erwartet. Von 2020 bis 2040 wird der neuen Bevölkerungsprognose entsprechend, nur von einem Rückgang von circa 1,3 Mio. Einwohner ausgegangen (BBSR, 2021a). Diese Prognose geht zudem davon aus, dass die Bevölkerungszahl in Deutschland sein Maximum im Jahr 2024 erreicht hat und vermehrt von Menschen im Rentenalter geprägt sein wird. Darin wird ein Anstieg von 23% an Rentner*innen im Zeitraum von 2020 bis 2040 erwartet.

2.2.2. Trends der Wohnungsnachfrage

Die Wohnungsnachfrage entwickelt sich im scheinbaren Widerspruch der zuvor analysierten Bevölkerungsentwicklung. Trotz der schrumpfenden Bevölkerung wird mehr Wohnraum benötigt (vgl. Abb. 7). Der Grund liegt im Strukturwandel der Gesellschaft. Triebkräfte der Wohnungsnachfrage sind nach einer Studie zu Trends der Wohnungsbautätigkeit des BBSR (2017a, S. 15) die arbeitsmarktorientierte Wanderung, Bedarfswandlungen als Folge altersstruktureller Trends und die internationale Zuwanderung. Wie die Bevölkerungsentwicklung schließen lässt und Abbildung 7 deutlich macht, gibt es in der Wohnungsnachfrage große regionale Unterschiede. Während in den alten Bundesländern die Größe der Haushalte stabil bleibt und die Zahl der Haushalte zunimmt, sinkt die Anzahl der Menschen pro Haushalt, sowie die Zahl der Haushalte in den neuen Bundesländern. Hier macht sich die die Auswirkung des Strukturwandels bemerkbar. Junge Menschen ziehen in die Stadt oder wirtschaftsstärkere Regionen, während die ältere Gesellschaft im gewohnten Umfeld verbleibt, selbst wenn die vorhandene Wohnfläche größer als der eigene Bedarf ist. (BBSR, 2021b, S. 4)

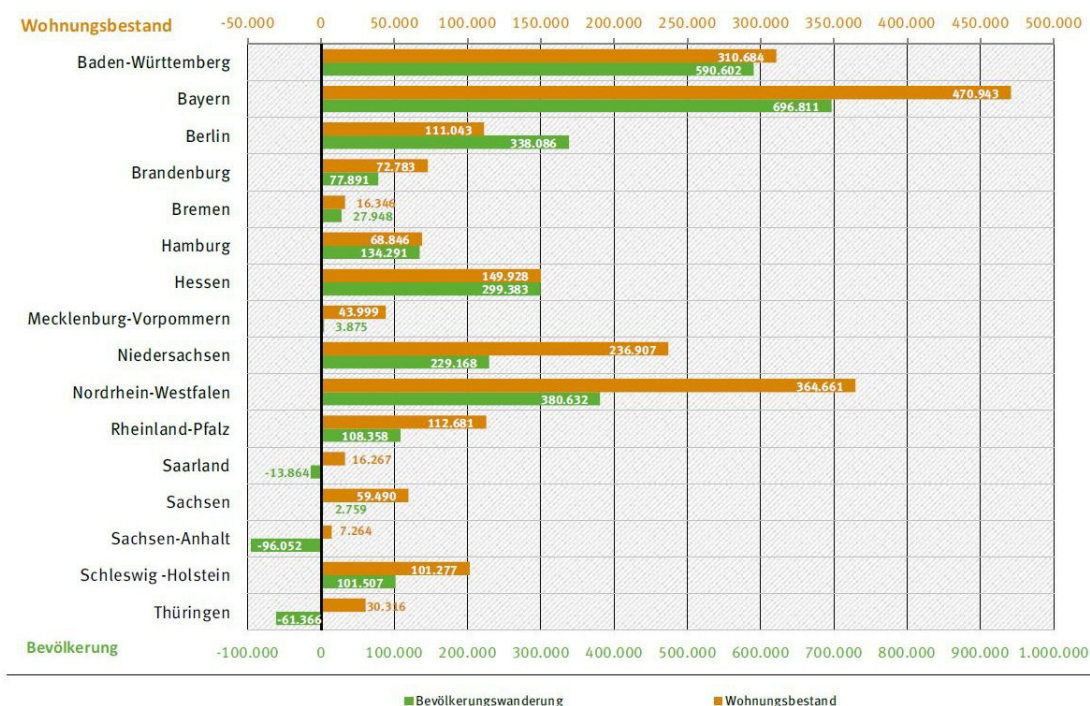


Abbildung 7: Veränderung Bevölkerung und Wohnungsbestand von 2011 bis 2020 (Umweltbundesamt, 2022c)

Die Haushaltsentwicklung ist einerseits abhängig von der Haushaltsgröße, das heißt der Anzahl, der in einem Haushalt lebenden Personen und andererseits der Wohnfläche, die eine Person für sich beansprucht. Der Trend geht hin zu kleineren Ein- bis

Zweipersonen-Haushalten. Die Anzahl kleiner Haushalte nimmt entsprechend der Raumordnungsprognose 2040 des BBSR (2021b) vom Basisjahr 2017 bis 2040 um 3,8% zu. Bis 2040 wird erwartet, dass 77,5% aller Haushalte in Deutschland nur von ein bis zwei Personen bewohnt werden. Wie oben erwähnt gibt es jedoch große regionale Unterschiede. Der Grund dieser Entwicklung liegt in der aktuellen Altersstruktur in Deutschland in Kombination mit neuen Lebensstilen. Sie führt dazu, dass die Nachfrage an kleinen Haushalten, vor allem von jungen und älteren Menschen gestiegen ist. Die höhere Lebenserwartung in Kombination mit den nun zur älteren Gesellschaft zählenden, geburtenstarken 60er Jahren, führen zu einer Nachfrage an flexiblen, kleineren Wohnungen. Diese Wohnform wird aber auch vom sesshaft werdenden Nachwuchs der älteren Generation nachgefragt. (Müller, 2015, S. 17–18) Die Abbildung 8 aus der Publikation von Müller macht das Verhalten der Wohnungsnachfrage, je nach Altersstruktur einer Generation deutlich.

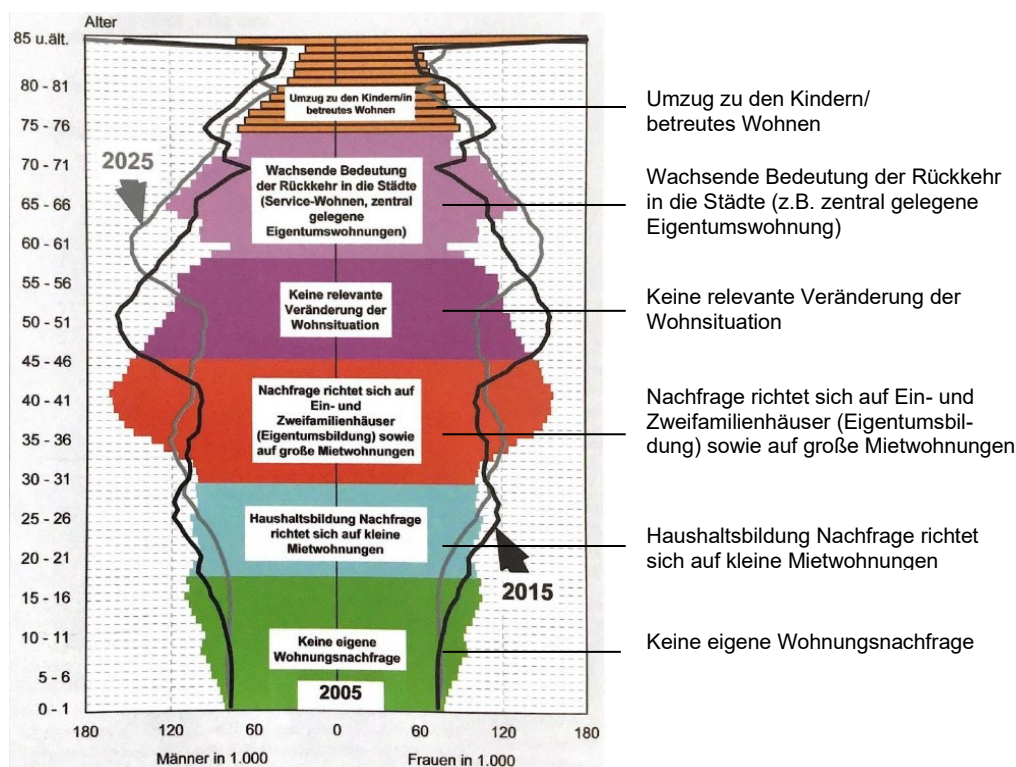


Abbildung 8: Wohnungsnachfrageverhalten je Altersstruktur (Müller, 2015, S. 19, Abb. 1.11)

Gleichzeitig zur Verkleinerung der durchschnittlichen Haushaltsgröße steigt die Wohnfläche pro Person an. Wobei auch hier Unterschiede zwischen Regionen deutlich werden. Deutschlandweit steigt die Pro-Kopf-Wohnfläche, während sie in den sieben Metropolen Berlin, Hamburg, München, Köln, Frankfurt, Stuttgart und Düsseldorf, eine sinkende Tendenz aufweist. Während eine Person in Deutschland durchschnittlich seit

2010 bis 2020 durchschnittlich 2,3m² mehr Wohnraum zur Verfügung hat, so bewohnte eine Person in den sieben Metropolen zwischen 2010 und 2018 im Durchschnitt 1,7m² weniger (Destatis, 2021c, S. 263–264; Statista, 2022b). Gründe hierfür sind zum einen der zunehmende Wunsch nach Wohneigentum, der mit einer durchschnittlichen höheren Wohnfläche pro Person gekoppelt ist (BBSR, 2015, S. 10). Zudem erhöht der Remanenzeffekt, das Verbleiben in der Immobilie nach Versterben oder Auszug Familienangehöriger, die durchschnittliche Wohnfläche in Bezug auf ganz Deutschland. Der Trend zu kleinen Haushalten führt darüber hinaus zu einem allgemein höheren Wohnflächenanspruch, da Serviceräume, wie Bad, Küche und Flur nun nur noch ein bis zwei Menschen statt einer ganzen Familie bedienen. (Müller, 2015, S. 17–18)

2.2.3. Wohnungsbedarf

Die Bevölkerungsentwicklung und die daraus entstehenden Entwicklungen des Wohnungsmarktes lassen Rückschlüsse auf den Wohnungsbedarf zu. Der Bedarf an Wohnung ist eine wichtige Variable in der Bestimmung des noch verfügbaren Treibhausgasbudgets für das Wohnen. Wie auch die Studien aus dem vorangegangenen Abschnitt, kommen auch die Deutschlandstudien zu dem Ergebnis, dass die deutschen Bevölkerungsdynamiken, als Effekt von Urbanisierung und Zuwanderung, zu einer Wohnungsknappheit in vielen deutschen Städten und deren Umland führen (Tichelmann et al., 2016; Tichelmann et al., 2019) (vgl. Abb. 9). Als Gebiete mit hohem Wohnungsbedarf werden solche definiert, in denen der errechnete Leerstand weniger 3,6% des Wohnungsbestandes beträgt. Die Grundlage des prognostizierten Wohnungsbedarfs aus der Deutschlandstudie 2019 bildet die Wohnungsmarktprognose 2030 des BBSR, sowie die allgemein definierte Bedarfsnorm, dass jedem Haushalt eine Wohnung zugeordnet sein soll. Die Aufstellung einer Bedarfsnorm nach Tichelmann et al. (2019) beinhaltet zudem die im folgenden beschriebenen Annahmen.

Es soll ein Mindestmaß an Leerstand erhalten bleiben, um Umzüge möglich zu machen oder natürliche Wohnungsabrissse oder Sanierungen abzufangen. Außerdem wird berücksichtigt, dass einem Haushalt teilweise zwei Wohnungen, durch den Besitz von Zweit- oder Ferienwohnungen, zugeschrieben werden. Während der Mikrozensus einen Haushalt, je nach wirtschaftlichen Eigenständigkeit definiert, ist in Tichelmann et al. (2019) ein Haushalt über das gemeinsame Wohnen definiert. Wohnheime gelten zum Beispiel als Mehrpersonenhaushalte. Zudem wird angenommen, dass das Realeinkommen in Zukunft steigt, was die Entwicklung von kleineren Haushalten mit tendenziell

mehr Wohnfläche erst möglich macht. In der Deutschlandstudie aus dem Jahr 2015 wurde angenommen, dass der mittelfristige jährliche Bevölkerungszuwachs circa 300.000 Personen pro Jahr beträgt. Statt Einwanderungszugewinnen von 600.000 Personen in den ersten Jahren, verzeichnete Deutschland jedoch 900.000 Personen pro Jahr in den Jahren 2016 und 2017. Dennoch wird an einem mittelfristigen Zuwachs durch Einwanderung von 300.000 Menschen pro Jahr ausgegangen. Das entstandene Wohnungsdefizit wird über die Annahme zum Nachholbedarf ausgeglichen. Das Wohnungsdefizit setzt sich also zusammen aus dem überraschenden Bevölkerungszuwachs und der zu trägen Bautätigkeit der letzten Jahre. Somit wird von einem Wohnungsdefizit von 1 Millionen Wohnungen ausgegangen. (Tichelmann et al., 2016; Tichelmann et al., 2019)

Zusammenfassend wird Wohnraum insbesondere aufgrund von Binnenwanderungen in Metropolregionen, für Bevölkerungszuwachs durch Immigration, sowie zum Ausgleich des bestehenden Wohnungsdefizits benötigt. Für den Zeitraum von 2019 bis 2022 geht Tichelmann et al. (2019) von einem mittelfristigen Wohnungsbedarf in Deutschland von jährlich 400.000 Wohnungen aus. Diese Annahme stellt die Antwort auf die Frage dar, wie viel neuer Wohnraum in Deutschland benötigt wird.

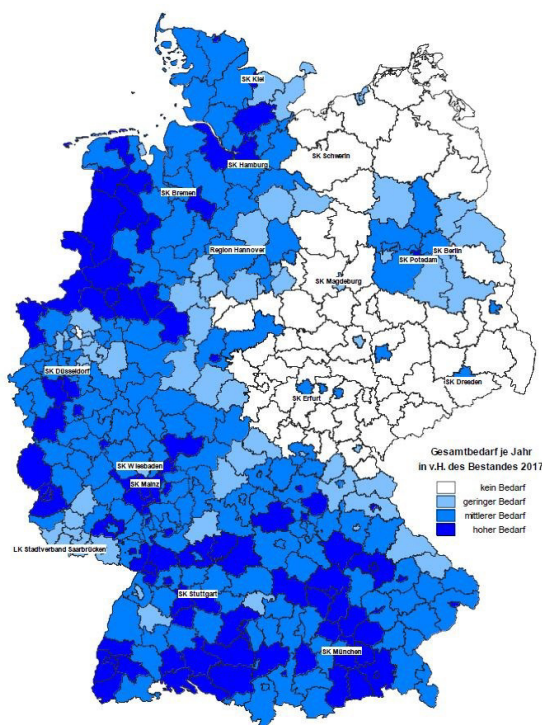


Abbildung 9: Wohnungsbedarf von 2018-2025 (Tichelmann et al., 2019, S. 21, Abb. 4)

2.2.4. Flächenverbrauch und Aufstockungspotenzial

Die Auseinandersetzung mit der Erschließung von neuem Wohnraum im urbanen Raum steht nicht nur aufgrund des erhöhten Bedarfs an Wohnungen in Metropolregionen, wie oben erläutert, im Fokus. Genauso ist auch aus ökologischer Sicht die Schaffung von Wohnraum innerhalb von schon erschlossenen Gebieten sinnvoll. Für diese Arbeit ist insbesondere der Aspekt, Treibhausgasemissionen einsparen zu können, ein großes Potenzial von Aufstockungen.

Die Fläche, die für Siedlungen und deren Infrastruktur benötigt wird, geht Landwirtschaftsflächen und Naturräumen verloren. Während landwirtschaftliche Flächen der Versorgungssicherheit dienen, erhalten Naturräume das ökologische Gleichgewicht und die Biodiversität. In der Vergangenheit stieg der Verbrauch an Siedlungsfläche bis in das Jahr 2004 stetig an. Auf den steigenden Flächenverbrauch reagierte die Bundesregierung mit einer Neuauflage der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Darin wird das Ziel verfolgt, im Jahr 2030 weniger als 30 Hektar für Siedlungs- und Verkehrsfläche zu benötigen, sodass der Flächenverbrauch aktuell rückläufig ist. Von 61 Hektar pro Tag im Jahr 2004, als Vier-Jahres-Mittelwert, werden nun, nach dem Stand aus dem Jahr 2020, noch circa 52 Hektar neue Siedlungs- und Verkehrsflächen pro Tag erschlossen. (Müller, 2015; UBA, 2022b) Der sinkende Flächenbedarf sollte mit dem Gesetz zur Stärkung der städtebaulichen Innenentwicklung aus dem Jahr 2013 unterstützt werden. Gemeinden sind somit verpflichtet zu prüfen, ob statt der neuen Baugebiete im Außenbereich auch Brachflächen im Innenbereich verwendet werden können. Diese Bestrebung wurde aber mit dem Baugesetzbuch 2017 (BauGB) und der damit verbundenen Einführung des §13b BauGB, die das Erweitern von Siedlungen im Außenbereich erleichterte, ausgebremst. Mit der neuen Regierung aus SPD, Bündnis 90/Die Grünen und der FDP soll der neue Paragraf im Baugesetzbuch aber nicht weiter verlängert werden. Das könnte zu einer beschleunigten Verringerung von benötigter Siedlungsfläche führen. Trotz den jüngsten politischen Entwicklungen scheint das Ziel, weniger als 30 Hektar pro Tag für Siedlungs- und Verkehrsflächen zu erschließen, nach dem verfehlten Zwischenziel für die Jahre 2017 bis 2020, aber nur mit konsequenter Weiterverfolgung von Verringerungsmaßnahmen erreichbar. (UBA, 2022b)

Möglichkeiten das Potential von ungenutzten Frei- und Gebäudeflächen zu nutzen, sieht Müller (2015) in Umnutzungen, sowie der horizontalen und vertikalen Nachverdichtung. Insbesondere die vertikale Nachverdichtung sticht durch seine besondere

Ressourceneffizienz bei der Erschaffung von neuem Wohnraum hervor. Sie eignet sich demnach besonders gut als Modell auf eine möglichst CO₂-arme und zukunftsfähige Art und Weise Wohnraum zu schaffen. Zum einen ist die benötigte Versorgungsinfrastruktur des neuen Wohnraums, wie Straßen oder Energie- und Internetbereitstellung vorhanden. Aber auch die gebäudebezogenen, inneren Erschließungen bestehen bereits oder müssen lediglich saniert werden. Zumeist wird der Bestand bei einer Aufstockungsmaßnahme aus wirtschaftlichen Beweggründen im gleichen Zuge energetisch saniert. Doch allein durch die Maßnahme einer Aufstockung, ohne gleichzeitige Sanierung, wird der Energieverlust des Bestands verringert. Mit der Annahme, dass der Bestand ein schlechtes Dämmniveau hat, wertet die Aufstockungsmaßnahme die obersten Geschossdecke, automatisch energetisch auf. Nicht zuletzt wirkt sich die vertikale Nachverdichtung auch positiv auf die Nachbarschaft aus. Während Bestandsbewohner von einer Verbesserung der oft gleichzeitigen Sanierung und der Umgestaltung des Außenbereichs profitieren, siedeln sich zudem haushaltsnahe Dienstleistungen aufgrund erhöhter Nachfrage in der Umgebung an. Auch eine verbesserte soziale Durchmischung kann, mit einem optimierten Wohnungsangebot der hinzukommenden Wohnfläche auf ein bestehendes Gebäude, erreicht werden. (Müller, 2015, S. 41)

Die Potentiale für Wohnraum durch vertikale Nachverdichtung hat Tichelmann et al. (2016) in der Deutschlandstudie aus dem Jahr 2015 genauer untersucht. Zur Abschätzung benötigter Emissionen für das Wohnen ist für diese Arbeit besonders interessant, wie viel erschließbare Wohnfläche auf bestehenden Mehrfamilienhäusern möglich wäre. Die mögliche, erschließbare Wohnfläche durch Aufstockungen gibt Auskunft darüber, wie lange mit dem errechneten Treibhausgasbedarf benötigter Wohnraum durch Aufstockungen geschaffen werden könnte.

Das untersuchte Quartier in Kempten entspricht dabei den Systemgrenzen aus der Studie und kann somit, wie als repräsentativ bewertet werden. Die Studie von Tichelmann et al. (2016) betrachtet bei der Quantifizierung des Wohnflächenpotenzials durch Aufstockungen nur Mehrfamilienhäusern mit drei oder mehr Wohnungen, nur Kreise mit ungesättigten Wohnungsmärkten, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, und nur Gebäude aus den Baujahren 1950-1989, da diese die baukonstruktiven Voraussetzungen für Aufstockungen aufweisen. Außerdem werden für das Primärpotenzial nur Gebäude aus Kerngebieten und solche, die nur einem Besitzer zuzuordnen sind, betrachtet. (Tichelmann et al., 2016, S. 5–7) Auf Grundlage der von Tichelmann et al. (2016) ermittelten 0,58 Millionen aufstockbaren Mehrfamilienhäusern, wird die

potenzielle Wohnfläche durch Aufstockung in der Deutschlandstudie wie folgt berechnet. Die durchschnittlich aufstockbare Dachfläche multipliziert mit der möglichen Anzahl an aufstockbaren Mehrfamilienhäusern ergibt die potenziell erschließbare Dachfläche. Diese wiederum wird multipliziert mit einem Verdichtungsschlüssel. Der Verdichtungsschlüssel besagt, dass im Mittel 1,3 Geschosse aus baukonstruktiver und baurechtlicher Sicht aufgestockt werden können. Die mögliche, zusätzliche Geschossfläche wird daraufhin mit dem Anteil der Wohnfläche an der Geschossfläche multipliziert. Im letzten Schritt wird die bereits erschlossene, ausgebaute Dachgeschossfläche von der ermittelten, möglichen Wohnfläche abgezogen.

Das Ergebnis dieser Berechnungen von Tichelmann et al. (2016) führt zu dem theoretischen Potenzial, 84,2 Millionen Quadratmeter Wohnfläche, allein über die Aufstockung von Mehrfamilienhäusern mit oben genannten Rahmenbedingungen zu schaffen. Würden auch Gebäude vor 1950 und Gebäude aus Eigentümergemeinschaften in gleichem Maße aufstockbar sein, könnten zusätzlich noch 31,8 Mio.m² Wohnfläche durch Aufstockung erschlossen werden. (Tichelmann et al., 2016, S. 57–65). Die daran anknüpfende Deutschlandstudie aus dem Jahr 2019 errechnet zudem das Potenzial für Aufstockungen auf Nicht-Wohngebäuden. Würden Einzelhandelsmärkte, Büro- und Verwaltungsgebäude oder Parkhäuser aufgestockt werden, so könnten weitere 73,5 Mio.m² Wohnfläche hergestellt werden.

Für diese Arbeit ist das Potenzial, Wohnraum durch vertikale Nachverdichtung herzustellen, wichtig um aufzuzeigen, wie lange es theoretisch möglich wäre innerhalb des berechneten Emissionsbedarfs Wohnraum herzustellen. Ist das Potenzial von zur Verfügung stehenden Aufstockungsflächen ausgeschöpft und fallen somit die ökologischen Vorteile von Aufstockungen weg, so ist mit einem erhöhten Emissionsbedarf in der Konstruktion zu rechnen.

2.3. Rahmenbedingungen für Aufstockungen

Dieses Unterkapitel definiert die baurechtlichen und baukonstruktiven Grundlagen, auf welchen die Fallstudie aus Kapitel 3 aufbaut. Das Ziel ist es, angefangen von einem großen, allgemeinen Maßstab, einen Handlungsspielraum aufzuspannen, damit im Folgenden, emissionsoptimierte Entwurfsentscheidungen immer innerhalb der zulässigen Rahmenbedingungen getroffen werden können. An die Ermittlung der baurechtlichen Grundlagen und Regelwerke schließt sich eine Zusammenstellung von baukonstruktiven Strategien des treibhausgasreduzierten Bauens an. Im letzten Abschnitt sind Merkmale typischer Gebäude aus den 50er-Jahren zusammengestellt. Sie werden benötigt werden, um ohne Vor-Ort-Prüfung eines Sachverständigen Aussagen zum Bestand zu ermöglichen.

2.3.1. Baurechtliche Anforderungen

Die baurechtlich bindenden Anforderungen an ein Bauvorhaben werden bundesweit über das Bauplanungsrecht, landesweit im Bauordnungsrecht, und auf Gemeindeebene in Satzungen und anderen öffentlichen Vorschriften konkretisiert. Sie definieren die Randbedingungen, wo und wie eine Baumaßnahme zulässig ist, welche Anforderungen an sie gestellt werden und wer für die Umsetzung des jeweiligen Zulassungskriterium verantwortlich ist. Die Einhaltung der rechtlichen Anforderungen bestimmen maßgeblich, ob eine Aufstockung realisiert werden kann. In der Praxis stehen oft die an das Baurecht gekoppelten, finanziellen und wirtschaftlichen Kriterien im Vordergrund. In dieser Arbeit allerdings, spannen die rechtlichen Mindestanforderungen einen Rahmen auf, inwieweit Optimierungen zum Treibhausgas-Bedarf einer Aufstockungsmaßnahme realisierbar sind.

Grundsätzlich wird das Bauplanungsrecht bundesweit über das Baugesetzbuch (BauGB) und die Baunutzungsverordnung (BauNVO) geregelt und bestimmt mit Hilfe der Bauleitplanung über die allgemeine Zulässigkeit eines Gebäudes. Nach §8BauGB dient diese im Wesentlichen dazu die städtebauliche Ordnung und das Allgemeinwohl zu bewahren. Das Bauordnungsrecht wiederum regelt einerseits Verantwortlichkeiten und Verfahren für Genehmigungen, andererseits stellt es baulich-technische Verpflichtungen an das Bauvorhaben. Das Ziel ist es nach §3MBO „die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben und Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen

nicht zu gefährden“. Das Bauordnungsrecht dient somit der Gefahrenabwehr, der Gestaltungspflege und dem Umweltschutz.(Fath et al., 2019, S. 55–56)

Anforderungen aus dem Baurecht, die im Wesentlichen die Umsetzung der Aufstockung aus der bearbeiteten Fallstudie beeinflussen, sind im Kapitel 3.2 auf das Beispielprojekt übertragen.

2.3.2. Baukonstruktive Anforderungen treibhausgasreduzierter Gebäude

Während die rechtlichen Anforderungen an das Gebäude erste Rahmenbedingungen festlegen, sollen anschließend Strategien angewendet werden, die das Bauen, explizit den Wohnungsbau, mit einem reduzierten CO₂-Fußabdruck möglich machen.

Das Rahmenwerk der DGNB für klimaneutrale Gebäude und Standorte teilt die entstehenden Treibhausgasemissionen des Bauprozesses auf in einen Emissionsbedarf während dem Betrieb und in Emissionen für die Herstellung, dem Verbau und der Verwertung von Baumaterialien (DGNB, 2020). Einige Maßnahmen, die in der Literatur aufgeführt sind, sind zwar relevant, wenn ein neues Gebäude entstehen soll, allerdings rücken viele bei der isolierten Betrachtung einer vertikalen Nachverdichtung in den Hintergrund. Zudem wird in dieser Arbeit nur die ökologische Nachhaltigkeit betrachtet, genauer die Minimierung der Treibhausgasemissionen. Die soziale und ökonomische Nachhaltigkeit, sowie die dritte Säule, die hier einzeln betrachtete ökologische Nachhaltigkeit, stehen allerdings in Wechselwirkung zueinander. Auch wenn die soziale und ökonomische Komponente zur Beantwortung der Forschungsfrage vernachlässigt wurde, müssen bei einer Gesamtbetrachtung zur Nachhaltigkeit außerhalb dieser Arbeit, alle Komponenten und deren Einfluss aufeinander berücksichtigt werden, um CO₂-Emissionen zu reduzieren.

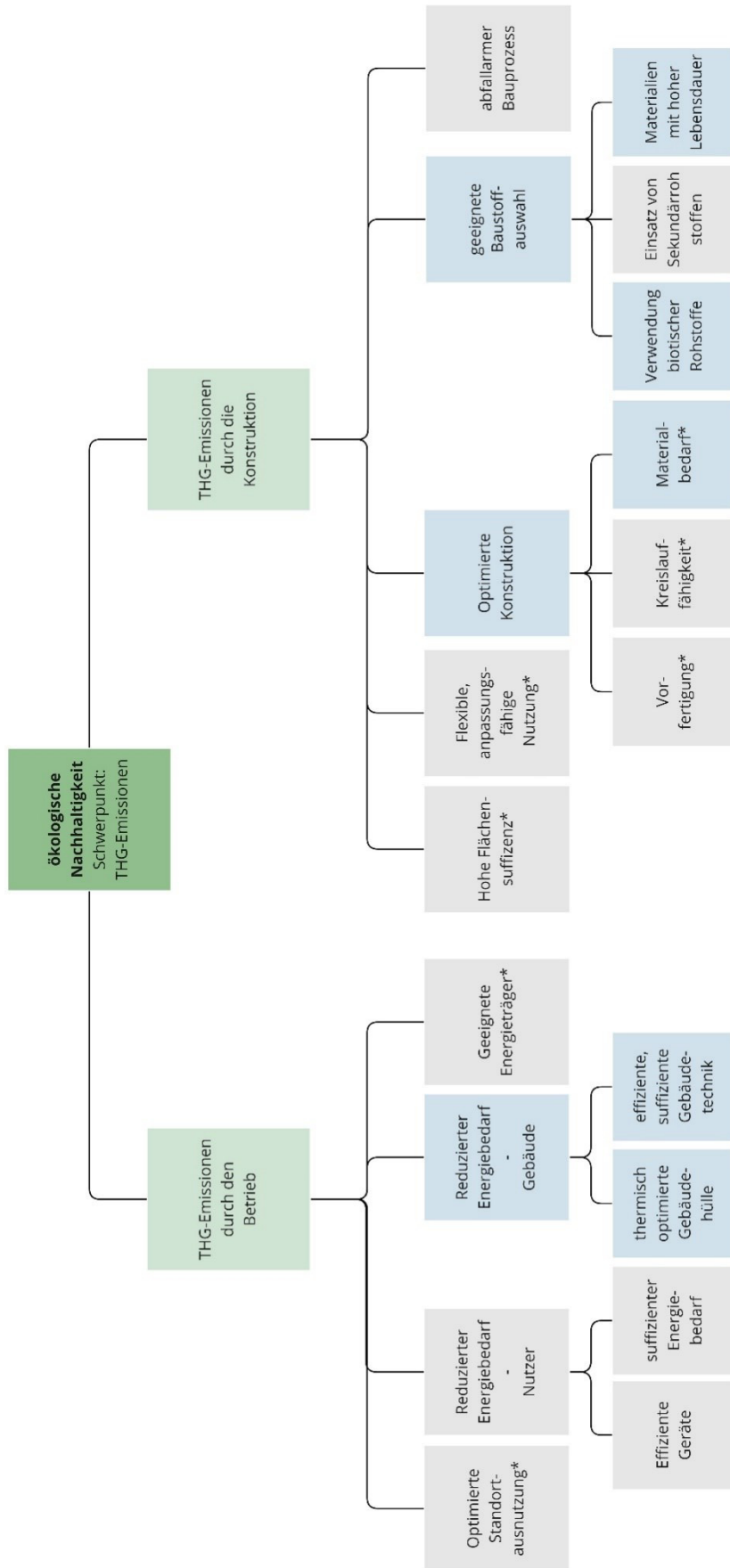
Die Abbildung 10 fasst das Rahmenwerk der DGNB (2020, S. 27–30), die Variablen der ökologischen Nachhaltigkeit von Gebäuden nach Friedrichsen (2018, S. 93–97) und die Nachhaltigkeitskriterien nach Drexler & El-khouli (2012, S. 80–89) zusammen. Die Darstellung gibt somit einen Überblick über Kriterien, die für die Planung von CO₂-reduzierten Aufstockungen eine entscheidende Rolle spielen. Die grau hinterlegten Felder stellen zwar wichtige Variablen dar, können aber im Rahmen der hier bearbeiteten Fallstudie nicht, oder nur bedingt beeinflusst werden, oder sind aufgrund notwendiger Vereinfachung vernachlässigt.

Die Menge der benötigten Energie im Betrieb wird maßgeblich vom Standort, dem Energieträger, dem gebäudeabhängigen und nutzerbedingten Energiebedarf bestimmt. Ein Neubau kann dem Standort gerecht geplant werden, während beim Bauen im Bestand die Stärken und Herausforderungen des städtebaulichen und klimatischen Kontextes berücksichtigt und ausgenutzt werden müssen. Daneben hat der Nutzer einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf. Effiziente Nutzeranwendungen, wie Küchengeräte und Beleuchtung, sowie eine bewusste Verwendung dieser Anwendungen können zu einer erheblichen Bedarfsreduktion führen, sind in der Planung aber nicht beeinflussbar. Anders wiederum kann mit Hilfe einer thermisch-optimierten Gebäudehülle und mit darauf abgestimmter, effizienter Gebäudetechnik in der Planungsphase die Grundlage für eine energieeffiziente Aufstockung gelegt werden. Während die Standortausnutzung und die gebäude- und nutzerabhängige Energiereduktion den Energiebedarf auf ein Minimum reduzieren, ermöglicht die Wahl des Energieträgers die Treibhausgasemissionen noch weiter zu senken. Ein geringerer Energiebedarf macht Versorgungssysteme möglich, wie zum Beispiel Passive, die sich vorher als ungeeignet oder nicht wirtschaftlich darstellten.

Der CO₂-Bedarf durch die Konstruktion von Aufstockungen wird maßgeblich beeinflusst durch das Maß der Flächenausnutzung, der Möglichkeit das Gebäude flexibel nutzen zu können, die Wahl der Konstruktion hinsichtlich seiner Kreislauffähigkeit, seines Vorfertigungsgrades und seines Materialbedarfs. Außerdem haben die Auswahl der Baustoffe, unter Berücksichtigung ihres gesamten Lebenszyklus, sowie ein abfallarmer Bauprozess einen großen Einfluss. Eine hohe Flächeneffizienz, beispielsweise durch Mehrfachnutzung der gleichen Fläche, spart Material und Betriebsaufwand, während ein flexibler Grundriss dazu beiträgt, dass sich die Aufstockung dynamisch an den aktuellen Lebensstil der Bewohner anpassen kann und Rückbau- oder Abrissmaßnahmen verhindert werden. Beide Optimierungsmöglichkeiten sind im Fallbeispiel nicht genauer ausgeführt, da sie schwer objektiv überprüft werden können. Die Konstruktion und die Baustoffauswahl bedingen sich gegenseitig und eröffnen einen großen Handlungsspielraum zur Reduzierung der Emissionen. Kreislauffähige Konstruktionen bestehen in der Regel aus biotischen Baustoffen oder können als Sekundärrohstoffe in den Kreislauf zurückgeführt werden. Bei geeigneter, baustoffspezifischer Konstruktion, die ihre höchste Qualität in der Vorfertigung erreicht, kann außerdem eine hohe Lebensdauer der einzelnen Materialien sichergestellt werden. Nicht zuletzt ist bei der Konstruktion von Gebäuden auch ein effizienter, abfallarmer Bauprozess für den

THG-Bedarf von Bedeutung. Der Bauprozess wird im Weiteren zwar quantifiziert, aber zur Vereinfachung nicht im Detail optimiert.

Die erläuterten Strategien dienen im Weiteren dazu eine treibhausgas-optimierte Aufstockung zu planen. Anforderungen an die Baukonstruktion werden in einem Entwurf zur Fallstudie so umgesetzt, dass sie diesen Strategien gerecht werden (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4). Durch diesen Ansatz kann eine Referenz für die spätere Quantifizierung der Emissionen geschaffen werden, die die Neuschaffung von Wohnraum mit so wenig wie möglich Treibhauspotenzial verkörpert.



* nur bedingt beeinflussbar in der Fallstudie

Abbildung 10: Strategien des treibhausgasreduzierten Bauens (eigene Darstellung)

2.3.3. Merkmale des Bestands

Den zur Verfügung gestellten Plänen für das Gebäude aus der Fallstudie ist zu entnehmen, dass das Quartier im Jahr 1953 errichtet wurde. Die vorliegenden Pläne zum Bestand für die Fallstudie geben aber nur wenig Rückschluss auf die verwendeten Konstruktionen des Bestands. Daher ist die Recherche zu den Eigenschaften typischer Mehrfamilienhäuser aus dieser Zeit wichtig, um den Bestand und den Umgang im Entwurf mit diesem einschätzen zu können.

Nach Giebeler et al. (2008) sind Nachkriegsgebäude zwischen 1950 und 1965 geprägt von der Sparsamkeit des Wiederaufbaus, der europaweiten Wohnungsknappheit, zumindest im ersten Drittel dieser Zeit, und dem Wirtschaftswunder in Deutschland ab 1952. Der Grundsatz im Städte- und Wohnungsbau war es eine funktionelle, sonnige, luftige und grüne gebaute Umwelt zu erschaffen. Das führte zu großzügigen Abständen zwischen den Gebäuden, kleinen Wohnungen und überschaubaren, maximal 4-geschossigen Einheiten. Die extreme Materialknappheit führte in der Baukonstruktion zu knapp berechneten Tragfähigkeiten, einem schlechten Schallschutz und zur Anfälligkeit für Feuchte. Die nachfolgenden Merkmale sind Giebeler et al. (2008, S. 173–189) entnommen.

Die oft, zusätzlich zu den Außenwänden, tragenden Innenwände führten zu geringen Spannweiten, wodurch Decken schlanker ausgeführt werden konnten. Vollziegel wurden nach dem 2. Weltkrieg aufgrund ihrer Materialintensivität in der Regel nicht mehr verwendet. Dafür wurde 1952 der Hohlziegel über die DIN 105 und Leichtbetonsteine über die DIN 18152 und 18151 eingeführt. Im selben Jahr erschien auch die erste Richtlinie zum Mindestwärmeschutz über die DIN 4108. Jedoch waren die geringen Vorgaben darin wenig effektiv. Ein 25 cm starkes Hohlblockmauerwerk wurde als ausreichend wärmedämmend beschrieben. Erst mit der Energiekrise wurde die DIN 1974 erneuert und verschärft. Heute finden sich in diesen Kellern oftmals Schäden durch aufsteigende Feuchte, sollten sie nicht schon damals für nässeempfindliche Güter oder Aufenthaltsräume ausgelegt worden sein. Über das Problem der Feuchte wissend und mit der Einführung neuer poröser und damit feuchteempfindlicher Baustoffe, wurden bewohnte Geschosse über die Spritzwasserebene von 50 cm gehoben. Die Gebäude der Nachkriegszeit weisen außerdem oft einen unzureichenden Luftschallschutz der Außenwände aus Leichtbetonsteinen auf. Aber auch die Innenwände entsprechen in der Regel nicht den aktuellen, schallschutztechnischen Standards.

Reparationszahlungen in Form von Holz und ausbleibende Holzimporte aus den USA, hatten zur Folge, dass Deutschland einen starken Holz-mangel nach dem 2. Weltkrieg verzeichnete. Die Materialknappheit, führte dazu, dass Holzbalkendecken durch Stahlbetondecken in beton- und stahlsparender Rippenbauweise abgelöst wurden. Für die Dimensionierung wurden, trotz der Materialeinsparung, auch 1950 kaum veränderte Lastannahmen, im Vergleich zu aktuellen Berechnungen, verwendet. Nach der damals geltenden DIN 1055 müssen auch nicht ausgebaute Dachgeschosse analog zu den Decken der Wohngeschosse ausgeführt werden und sind für eine Nutzlast von 2 kN/m^2 ausgelegt. Bei unverändertem Deckenaufbau ist ein Nachweis beim Ausbau des Dachgeschosses daher in der Regel nicht erforderlich. Bei zusätzlichen Auflasten müssen die Decken jedoch, aufgrund fehlender Lastreserven, ertüchtigt oder durch eine neue lastverteilende Ebene erweitert werden. Bedingt durch die leichte Deckenkonstruktion und die schmalen Querschnitte infolge der maximalen Materialsparsamkeit weisen die Decken der Nachkriegszeit in der Regel jedoch einen sehr schlechten Schallschutz auf.

Die Holzknappheit der Nachkriegsjahre führte auch dazu, dass Fenster nur in schlechter Qualität hergestellt werden konnten. Häufig wurden diese deshalb schon in den 70er Jahren ausgetauscht. Treppen der 50er Jahre entsprechen in ihren Traglasten den heutigen Anforderungen und sind in der Regel mängelfrei, trotz fehlender Maßnahmen zum Schallschutz sind sie dennoch schallschutztechnisch auch heute noch ausreichend und daher unsaniert erhaltenswert.

2.4. Ökobilanzierung im Bauwesen

Entgegen der Methode zur Treibhausgasbudgetierung gibt es zur Erstellung von Ökobilanzen für ein Produktsystem bereits in Regelwerken festgeschriebene Vorgehensweisen. Im Folgenden wird die Methodik allgemeiner Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040, sowie die spezifischen Eigenschaften einer Lebenszyklusanalyse (eng. life-cycle assessment, LCA) für Gebäude beschrieben, um schließlich auf das Vorgehen zur Ökobilanzierung von Aufstockungen einzugehen. Diese Grundlagen und der aktuelle Stand zur spezifischen Anwendung von Ökobilanzen für Aufstockungen sind Hintergrund und Anknüpfungspunkt der hier durchgeführten Ökobilanz zur Fallstudie in Kapitel 3.5.

2.4.1. Allgemeine Grundlagen und Methodik

Die Ökobilanzierung, auch Lebenszyklusanalyse wird nach DIN EN ISO 14040 definiert als die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Output-Flüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“. Das Ziel der Ökobilanz ist es, relevante Indikatoren und mögliche Verbesserungen der Umwelteigenschaften eines Produktes aufzuzeigen und diese insbesondere an Entscheidungsträger, die im Zusammenhang zum Produkt stehen, zu kommunizieren (DIN EN ISO 14040:2009-11, S. 4). Um die ökologische Qualität und die Wirkungen eines Produktes oder eines ganzen Produktsystems miteinander vergleichen zu können, ist ein einheitlicher Bemessungs-, Bewertungs- und Bilanzierungsmaßstab notwendig. Aus diesem Grund sind allgemeine „Grundsätze und Rahmenbedingungen“ über die DIN EN ISO 14040 und „Anforderungen und Anleitungen“ zur Durchführung einer Ökobilanz über die DIN EN ISO 14044 definiert.

Die Ökobilanz wird in der DIN EN ISO 14040 in folgende vier Phasen aufgeteilt: Die Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und die Auswertung. Da die Maßnahmen innerhalb der Phasen immer auch an die anderen Phasen und deren Änderungen gekoppelt sind, ist die aufgeführte Reihenfolge allerdings nur bedingt als chronologisch zu begreifen. Die Ökobilanz ist innerhalb und zwischen den Phasen immer ein iterativer Arbeitsprozess (vgl. Abb. 11).

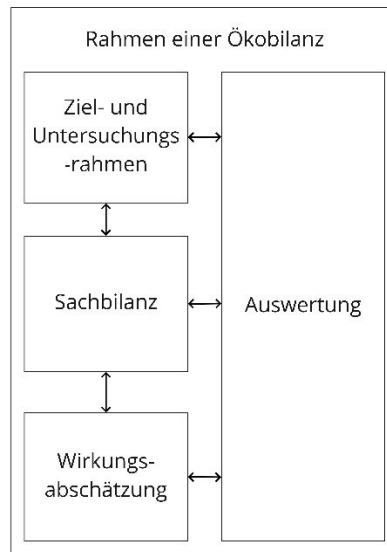


Abbildung 11: Aufbau einer Ökobilanz (eigene Darstellung nach DIN 14040)

2.4.2. Ökobilanzen für Gebäude

Vor dem Hintergrund, dass die Herstellung und der Betrieb von Gebäuden in Deutschland laut Bundesregierung für 28% aller CO₂-Emissionen verantwortlich ist, hat die Optimierung der Emissionen innerhalb eines Gebäudelebenszyklus großes Potenzial die nationalen Treibhausgasemissionen zu verringern (Bundesregierung, 2022). Auf Basis der oben aufgeführten, allgemeinen Normen zur Ökobilanzierung werden die Rahmenbedingungen für gebäudebezogene Ökobilanzierungen in der DIN EN 15643-2 geregelt und in der DIN EN 15978 „Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden“ konkretisiert.

Abweichend von den allgemeinen Normen unterteilt die DIN EN 15978 den Lebenszyklus in verschiedene Module. Diese Norm schafft eine einheitliche Grundlage für Lebenszyklusszenarien von Gebäuden und erleichtert damit die Kommunikation von Systemgrenzen. Dabei werden vier Phasen unterschieden: die Herstellung (A1-3), die Errichtung (A4-5), die Nutzung (B1-7) und das Ende des Lebenszyklus. Außerhalb der Systemgrenze ist zusätzlich das Modul D aufgeführt. Dieses zusätzliche Modul bietet die Möglichkeit Gutschriften durch die Wiederverwendung, Rückgewinnung oder durch Recycling, die sich außerhalb der Systemgrenzen befinden, mitzubedenken.

Neben den gebäudebezogenen Lebenszyklusphasen geht die DIN EN 15978 zudem, über die Einführung eines funktionalen Äquivalents, auf die Definition einer sinnvollen funktionellen Einheit ein. Das funktionale Äquivalent „ist eine Darstellung der

geforderten technischen Eigenschaften und Funktionen eines Gebäudes“ (DIN EN 15978:2012-10, S.18). Somit beschreibt das funktionale Äquivalent das betrachtete Produktsystem hinsichtlich seines zu erfüllenden Nutzens. Außerdem verfolgt es das Ziel, eine transparente Grundlage für den Vergleich mit gleichwertigen Produktsystemen zu schaffen. Unterschiedlichen funktionalen Äquivalenten können gleiche funktionelle Einheiten, also Bezugseinheiten, zugewiesen werden. Für die funktionelle Einheit eines Quadratmeters Wandfläche könnte das funktionale Äquivalent zum Beispiel darüber definiert sein, dass alle Bauteile dem gleichen U-Wert entsprechen sollen. (Zeumer, 2014, S. 27)

In der Praxis wird für die Sachbilanz auf Datenbanken zurückgegriffen, um den Arbeitsaufwand zu verringern und gleichzeitig eine gemeinsame Datengrundlage für alle Ökobilanzen zu bilden. Für die Vergleichbarkeit und eine gute Datenqualität umfassen die Datensätze der Datenbanken Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations, EPDs), die nach DIN EN 15084 genormt sind. Die Norm regelt unter anderem die Lebenszyklusphasen der Bauprodukte. Die Phasen sollen dabei den Lebenszyklusphasen der Ökobilanzierung für Gebäude entsprechen, damit die Verwendung der EPDs auf Materialebene auch in der Gebäudeebene unkompliziert möglich ist (Zeumer, 2014, S. 36). Bekannte Datenbanken in Europa sind die Ökobau.dat, ecoinvent, Gabi oder die European Reference Life Cycle Data (Fath et al., 2019, 112).

2.4.3. Ökobilanzen für Aufstockungen

Zum Zeitpunkt der Studie von Fath et al. (2019), wie auch jetzt für die Durchführung dieser Arbeit, gibt es noch keine genormte Methode für die Ökobilanzierung von Aufstockungen. Das Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen (BNB) und die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) geben zwar Regeln für die ökologische Bewertung von Sanierungsmaßnahmen vor. Diese unterscheiden sich aber voneinander, sodass die Ergebnisse nicht vergleichbar sind. Fath et al. (2019) schlagen daher eine eigene Methode vor. In der Bilanz nach Fath et al. (2019) sind die Emissionen für die rückzubauenden Gebäudeteile vor der Aufstockung, die Emissionen für die Herstellung der Aufstockung und für die Sanierung sowie die Emissionen für den Betrieb des sanierten, aufgestockten Gebäudes eingerechnet. Am Ende des Lebenszyklus wird der Rückbau für die Aufstockung und den sanierten Bestand bilanziert (vgl. Abb. 12).

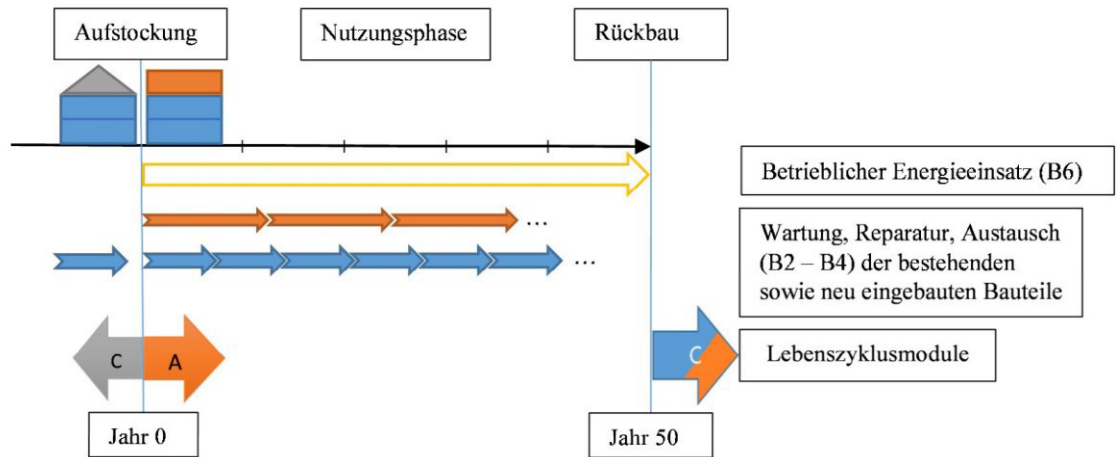


Abbildung 12: Methode zur Ökobilanz von Aufstockungen (Fath et al., 2019, S. 114, Abb. 29)

Forschungsbedarf am eigenen Ansatz sehen die Autoren darin, zu untersuchen, ob die Emissionen für den Rückbau vor der Aufstockungsmaßnahme bedenkenlos zum Modul C der Ökobilanz für die Aufstockung addiert werden können. Die aktuellen, in den Datenbanken ausgewiesenen, Materialien verhalten sich unter Umständen anders als die im Bestand verbauten Werkstoffe. Mit dieser Herausforderung gehen auch das BNB und die DGNB für die Ökobilanzierung von Sanierungsmaßnahmen unterschiedlich um. Während das BNB für das Ende des Lebenszyklus das gesamte, sanierte Gebäude, ähnlich der Studie von Fath et al. (2019), bilanziert, berechnet die DGNB nur den Rückbau der Materialien, die während der Sanierungsmaßnahme verbaut wurden.

Das funktionale Äquivalent der Ökobilanz in der vorliegenden Arbeit bezieht sich auf das Erschaffen von Wohnraum. Durch eine Sanierung wird vorhandener Wohnraum aufgewertet, oder wieder bewohnbar gemacht. Dennoch werden Sanierungsmaßnahmen in dieser Arbeit nicht als Erschaffung neuen Wohnraumes definiert. Die explizite Abgrenzung von Aufstockung und Sanierung führt dazu, dass die Strategie von Fath et al. (2019) nicht übernommen werden kann. Die Herangehensweise von Fath et al. (2019) dient somit nur als Orientierung der eigenen Strategie. Im Kapitel 3.5 ist die Methode der LCA dieser Arbeit und ihre Durchführung im Detail beschrieben.

3. Durchführung der Fallstudie

Dieses Kapitel beschreibt die Arbeitsschritte, die zum Vergleich eines nationalen Treibhausgasbudgets für Wohnraum mit dem Emissionsbedarf zur Herstellung und dem Betrieb des prognostizierten Wohnflächenbedarfs führen. Die Ableitung eines spezifischen Treibhausgasbudgets, steht vorerst für sich allein und beantwortet die Forschungsfrage, wie viele Treibhausgasemissionen dem deutschen Bausektor zugeschrieben werden können. Die Unterkapitel zur Ausarbeitung der Modellstudie (Kapitel 3.2, 3.3, 3.4) bauen aufeinander auf und beschäftigen sich mit der Forschungsfrage, welche Kriterien den CO₂-Fußabdruck in der Konstruktion und beim Betrieb einer Aufstockung beeinflussen und wie sie nach heutigem Stand der Technik emissionsreduziert ausgeführt werden können. Die Treibhausgasemissionen der Modellstudie werden in Kapitel (3.5) über eine Ökobilanzierung quantifiziert. So kann der aus den Forschungsfragen benötigte Bedarf an Treibhausgasemissionen für einen Quadratmeter neue Wohnfläche beantwortet werden. Innerhalb der folgenden Abschnitte wird zuerst der Gegenstand und die Notwendigkeit der dort beschriebenen Untersuchung erläutert. Daraufhin werden relevante Einflussparameter und Rahmenbedingungen aufgezeigt und analysiert. Die Parameteranalyse führt schließlich dazu, dass eigene Annahmen für die Fallstudie getroffen werden können.

3.1. Ableitung eines Treibhausgasbudgets

In Anlehnung an Priore et al. (2021) und Habert et al. (2020) und wie in Kapitel 2.1.3 umrissen, ist im Folgenden die detaillierte Ableitung eines Treibhausgasbudgets für den deutschen Wohnungsbau aufgeführt. Im Anhang A können die Rechenschritte noch genauer nachvollzogen werden. Das so formulierte Treibhausgasbudget wird benötigt, um die Emissionen aus der Fallstudie in Kempten zu bewerten und im Anschluss Rückschlüsse auf den deutschen Wohnungsmarkt zu ziehen. Abbildung 13 zeigt schrittweise das Vorgehen zur Ermittlung eines solchen Budgets innerhalb dieser Arbeit.



Abbildung 13: Schritte bei der Ableitung des Treibhausgasbudgets für das Wohnen (eigene Darstellung)

Globales Budget

Die Grundlage des hier abgeleiteten Treibhausgasbudgets bildet das globale Budget. Je nach Definition und angestrebten Klimaziel variiert das globale Emissionsbudget aber stark. Unter welchen Abwägungen das globale Budget in dieser Arbeit definiert wird, ist im Folgenden erläutert.

Die weltweit wissenschaftlich anerkannten Sachstandsberichte des IPCC stellen die Basis zur Ermittlung der globalen Grenzen dar. Aus ihnen geht sowohl die Methodik hervor, diese Grenzen herauszufinden, als auch die Aufstellung von möglichen Temperaturentwicklungen. Der IPCC Sonderbericht unterstreicht die Sensibilität des Klimas in der Wahl der ersten Worte für den Sachstandsbericht: „every bit of warming matters, every year matters, every choice matters“ (IPCC, 2019, S. iv). Der Einfluss geringster Temperaturveränderungen, hat demnach erhebliche Auswirkungen auf das Klima und kann verheerende Kipppunkte im Ökosystem auslösen. Die unklare Formulierung des Ziels aus dem Pariser Klimaabkommen, die Erderwärmung auf „deutlich unter 2°C“ zu begrenzen, lässt jedoch Interpretationsspielraum für eine Zieltemperatur offen. Der IPCC plädiert im Sonderbericht zu einem 1,5°C-Ziel als Temperaturobergrenze. Um dieses Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% zu erreichen, würde, ausgehend vom 01.01.2018, noch ein globales Budget von 580 Gt CO₂ zur Verfügung stehen. Um eine Temperatur von 1,5°C mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% nicht zu überschreiten, dürften allerdings nur noch 420 Gt CO₂ emittiert werden. Bei einer Zieltemperatur 1,75°C und einer Wahrscheinlichkeit von 67% dieses Ziel zu erreichen, würden noch 800 Gt CO₂ zur Verfügung stehen. (IPCC, 2019, S. 107) Auch der Umweltbundesrat (2021) macht auf den problematischen Interpretationsspielraum des Pariser Klimaabkommen aufmerksam. Die bisher vorgelegten NDCs der Länder würden ein weit größeres Budget benötigen, als noch Treibhausgasbudget für ein 1,5°C Ziel vorhanden wäre. Der IPCC Sonderbericht kommt zum Schluss, dass selbst bei erfolgreicher, vollständiger Umsetzung der NDCs ein Temperaturanstieg von 2,9°C- 3,4°C erreicht werden würde (IPCC, 2019, S. 357).

Aufgrund der Sensibilität der Temperatur auf das Klima und den politisch problematisch gewählten Zielen, verfolgt das hier abgeleitete, absolute CO₂-Budget das Ziel die Erderwärmung mit der höchsten, berechneten Wahrscheinlichkeit nicht über 1,5°C steigen zu lassen. Für diese Arbeit soll die Zieltemperatur bis zum Jahr 2100, maximal 1,5°C betragen und mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% erreichbar sein. Daraus ergibt sich

aus dem Sonderbericht des IPCC (2019, S. 107) ein globales Budget von 420 Gt CO₂ für einen bedarfsabhängigen Zeitraum ab 01.01.2018.

Nationales Budget

Das oben definierte globale CO₂-Budget von 420 Gt CO₂, ausgehend vom Startjahr 2018, wird im nächsten Schritt in ein nationales Treibhausgasbudget übersetzt. Die Aufteilung auf ein nationales Budget bildet die Grundlage, um sich auf die Emissionen des deutschen Wohnungsmarktes begrenzen zu können. Zusätzlich zur Aufteilung wird in diesem Abschnitt eine gemeinsame Einheit für das Budget gefunden, die den Vergleich mit der Ökobilanz der Fallstudie und zur Literatur ermöglicht.

Grundsätzlich kann bei der Aufteilung des verfügbaren Gesamtbudgets auf die Länder wissenschaftlich oder politisch motiviert vorgegangen werden. Das globale Budget kann entweder nach bestimmten Verteilkriterien in nationale Budgets aufgeteilt werden, oder es wird abgeleitet von den selbst definierten Klimaschutzzielen eines Landes abgeleitet. Um die klimaphysikalische Grundlage der IPCC Berichte und damit die eindeutige Wirkung auf die globale Erwärmung aufrechtzuerhalten, verfolgt diese Arbeit den wissenschaftlichen Ansatz ein nationales Budget auf Grundlage politisch unbeeinflusster Verteilkriterien zu definieren. Im Folgenden werden aber beide Möglichkeiten betrachtet und gegenübergestellt

Nationales Budget – wissenschaftlich motiviert

Zur Ableitung nationaler Budgets gibt es laut dem Umweltrat (2021) mindestens fünf verschiedene Interpretationsmöglichkeiten. Ein nationales Budget kann auf Grundlage der Bevölkerungszahl entweder über die prozentuale, aktuelle oder prognostizierte Einwohnerzahl ermittelt werden. Zusätzlich zur Einwohnerzahl können in einer weiteren Zuweisungsmethode historisch kumulierte Emissionen eines Landes miteinbezogen werden. Ein anderer Ansatz ist es, die Wirtschaftskraft eines Landes in Relation zur ökonomischen Leistungsfähigkeit der anderen Länder zu stellen. Je mehr Wirtschaftsleistung ein Land erzielt, desto höher die CO₂-Emissionen und damit die Verpflichtung diese verstärkt zu reduzieren. Eine Kombination aus historischen Emissionen und der Aufteilung nach Wirtschaftskraft ist die Zuweisung von Entwicklungsrechten. In einem Land mit niedrigem Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist, nach dieser Methode, ein großer Entwicklungs- und Wohlstandsfortschritt notwendig, womit historisch noch nicht beanspruchte, fossilbasierte Entwicklung gerechtfertigt wird. Gleichzeitig werden Staaten mit

hohem BIP und historisch hohen Emissionen ein kleineres CO₂-Budget gutgeschrieben. Eine weitere Aufteilungsmöglichkeit ist das „grandfathering“, welches die EU bei der Definition ihrer NDCs verfolgt. Dabei wird unabhängig von Bevölkerung und Wirtschaftskraft an der aktuellen Verteilung der Emissionsanteile festgehalten. Ein Land mit vergleichsweise hohen Emissionen wird auch für die Zukunft dieser Anteil an den Gesamtemissionen gutgeschrieben. (Umweltrat, 2021, S. 48)

In dieser Arbeit ist das globale Budget nach der Einwohnerzahl eines Landes aufgeteilt. Dabei wird jedem Menschen der Welt ein gleiches Emissionsbudget zugeschrieben. Kriterien zur nationalen Verantwortung, die Möglichkeit zur Emissionseinsparung oder die politische Umsetzbarkeit eines Landes werden bei dieser Methode allerdings vernachlässigt. Die deutsche Bevölkerung entspricht 1,09% der Weltbevölkerung, wenn davon ausgegangen wird, dass Deutschland im Jahr 2018 82,91 Millionen Einwohner verzeichnete, während die Weltbevölkerung im selben Jahr bei 7.592 Milliarden Menschen lag (WBG, 2021a). Es wurde das Jahr 2018 gewählt, da auch der IPCC Sonderbericht das Jahr 2018 als Startjahr heranzieht. Das resultierende CO₂-Budget für ein 1,5°C-Ziel in Deutschland beträgt, ab dem 1.1.2018 somit 4.586,46 Mt CO₂, was 1,09% des Gesamtbudgets entspricht. Für ein 2°C-Ziel würde das Budget für Deutschland 12.776,59 Mt CO₂ betragen.

Da für die Jahre 2018, 2019 und 2020 schon Emissionsverbräuche vorliegen, wäre ein nationales Budget ab 2018 veraltet. Demnach müssen dem oben definierten Ursprungsbudget diese Emissionsverbräuche ab 2018 abgezogen werden, sodass Deutschland ab 01.01.2021 für ein 1,5°C-Ziel noch 2.477,46 Mt CO₂ und für ein 2°C-Ziel noch 10.667,58 Mt CO₂ zur Verfügung stehen.

Nationales Budget – politisch motiviert

Neben dem Ansatz, ein Budget unter Berücksichtigung eines konkreten Temperaturziels aufzuteilen, kann ein absolutes, nationales Emissionsbudget auch auf Grundlage nationaler Klimaziele, hier des deutschen Klimaschutzgesetzes, formuliert werden. Für Deutschland sind diese, wie nachfolgend aufgezeigt, nicht mit dem 1,5°C-Ziel vereinbar, sondern kommen dem vagen Ziel von weniger als 2°C Erderwärmung aus dem Pariser Klimaabkommen nach.

Im zum Zeitpunkt der Arbeit, gültigen Klimaschutzgesetz vom August 2021, sind zum einen absolute Reduktionsanteile der Gesamtemissionen, als auch Emissionsziele für

einzelne Wirtschaftssektoren festgelegt. Die prozentualen Reduktionsziele werden im KSG über das Referenzjahr 1990 definiert. Im Jahr 1990 benötigte Deutschland demnach 1.052 Mt CO₂ bzw. 1.249 Mt CO₂eq (Statista, 2021a; UBA, 2021b). Bezogen auf 1990 legt das KSG Minderungsziele für jedes Jahr ab 2030 bis 2040 fest. Die prozentuale Minderung kann dann in konkrete Zielbudgets übersetzt werden. Da das KSG keine Budgets vor 2030 definiert, werden die Zielbudgets für die Jahre von 2021 bis 2029 so interpoliert, dass sich ein linearer Verlauf des Budgets in diesem Zeitraum einstellt (vgl. Abb. 14). Das resultierende Emissionsbudget für Deutschland ab 01.01.2021 beträgt nach dieser Methode 7.521,54 Mt CO₂ bzw. 8.814,12 Mt CO₂eq.

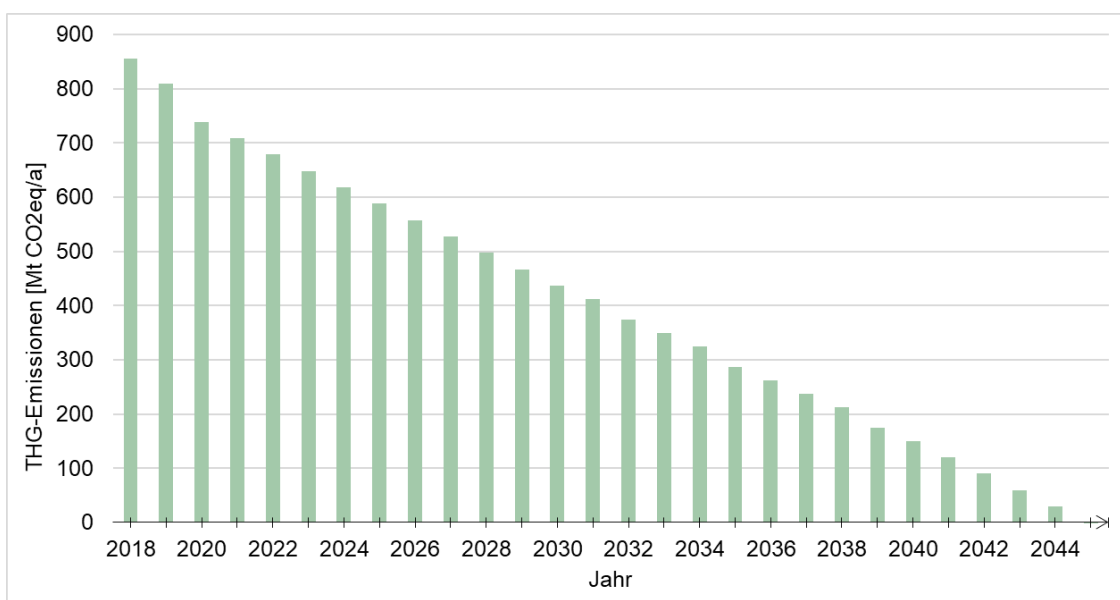


Abbildung 14 :Nationales Treibhausgasbudget nach KSG (eigene Darstellung)

Abbildung 15 verdeutlicht das Abweichen der Ziele je nach wissenschaftlicher Zieldefinition und politischem Ansatz. Das ermittelte Treibhausgasbudget für ein 1,5°C-Ziel, von 2.815,31 Mt CO₂eq, ist mehr als dreimal geringer als, das Treibhausgasbudget aus dem KSG von 8.814,12 Mt CO₂eq. Das absolute Budget ist in der Abbildung 15, für einen besseren Vergleich so aufgeteilt, dass sich ein linearer Reduktionspfad einstellt. Es wird demnach davon ausgegangen, dass ausgehend von dem aktuellen Emissionsbedarf, die Emissionen jedes Jahr um eine gleiche Menge reduziert werden können. Die benötigte Reduktion errechnet sich dabei über das absolute Budget für das jeweilige Ziel. Die Treibhausneutralität für ein 1,5°C-Ziel müsste nach linearer Reduktion somit, anders wie im KSG angestrebt, schon 2029 erreicht werden. Der Einfluss anderer Reduktions-szenarien auf das Treibhausgasbudget sind in Kapitel 5 diskutiert.

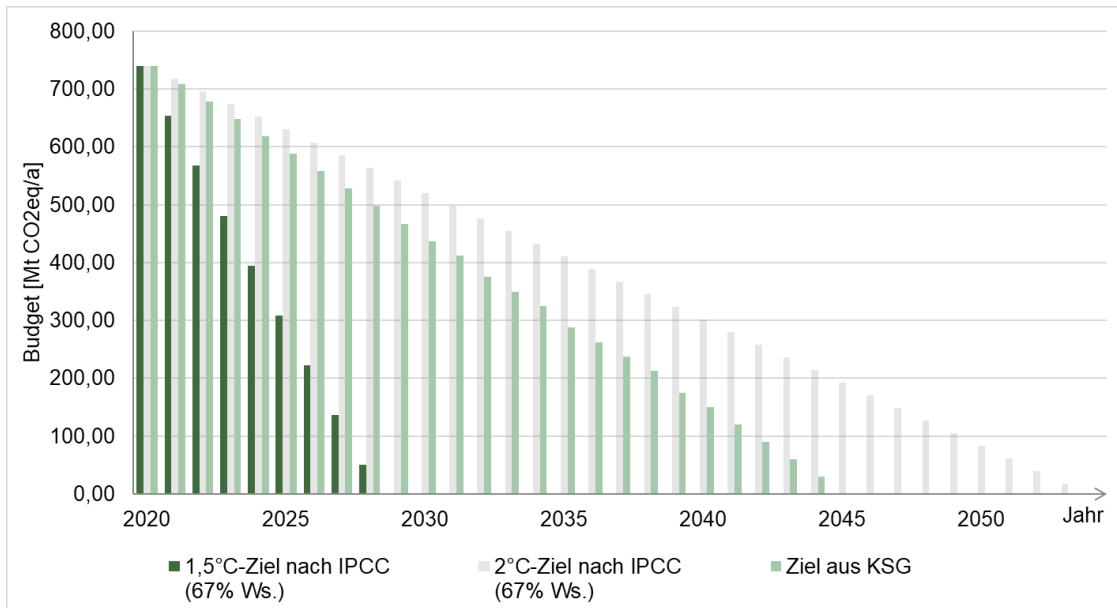


Abbildung 15: Nationales Treibhausgasbudget nach Zieldefinition (eigene Darstellung)

Nationales Budget- Einheit

Beim Vergleich des nationalen Emissionsbudgets, aufgeteilt über die Einwohnerzahl mit dem nationalen Budget aus dem Klimaschutzgesetz wird deutlich, dass sie sich in ihren Einheiten unterscheiden. Während im IPCC- Bericht die Rede von einem CO₂-Budget in CO₂-Emissionen ist, so definiert das KSG ein Treibhausgasbudget, über CO₂-äquivalente Emissionen, (CO₂eq).

CO₂-Äquivalente vereinheitlichen die Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase. Somit kann der Beitrag von unterschiedlichen Tätigkeiten zur Erderwärmung umfassender und vergleichbarer dargestellt werden. Mit der Herausforderung ein Budget herzu-leiten, das mit politischen Debatten aber mit Ökobilanzierungen von Produktsystemen vergleichbar ist, beschäftigt sich auch der Bericht des Umweltrats (2021, S. 54). Das Klimaabkommen definiert Emissionsbudgets in CO₂-Emissionen mit dem Verweis auf die Wissenschaft, insbesondere den Berichten des IPCC. Da im Jahr 2014, 88% der deutschen Treibhausgasemissionen dem Treibhausgas CO₂ zugeschrieben werden konnten, vergleicht der Bericht des Umweltrats das Paris kompatible CO₂-Budget ohne Umrechnung mit dem deutschen Treibhausgasbudget. Begründet wird dies einerseits durch den hohen Anteil an CO₂-Emissionen, aber auch damit, dass zwei Drittel, und damit der Großteil aller Nicht-CO₂-Emissionen auf die Landwirtschaft und die Abfallwirt-schaft entfielen und damit nur einen geringen Einfluss auf den betrachteten Bausektor hätten. Andere Quellen wie beispielsweise der CRREM (2019) stützen sich auf Zweit-studien, die hauptsächlich auf Grundlage der IPCC-Berichte entstanden sind. Um

möglichst nahe am IPCC-Sonderbericht zu bleiben, verfolgt die vorliegende Arbeit den folgenden Ansatz.

Das ermittelte nationale CO₂-Budget ist anteilig um das Treibhausgaspotenzial historischer Treibhausgasemissionen erhöht. Der Berechnung des Umweltbundesamtes folgend, werden dabei neben Kohlenstoffdioxid die Gase Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid (N₂O) und die fluorierten Treibhausgase, F-Gase: teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFCs), voll halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFCs), Schwefelhexafluorid (SF₆), Stickstofftrifluorid (NF₃) betrachtet (UBA, 2020). Zur Umrechnung des CO₂-Budgets in ein CO₂eq-Budget, werden die zuletzt verfügbaren Daten aus dem Jahr 2018 aus dem Bericht des Umweltbundesamtes (2020, S. 138) verwendet. Mit diesen Daten kann der Anteil der einzelnen Gase ermittelt und das CO₂-Budget um andere Treibhausgase erweitert werden. Das durch diese Berechnung resultierende, nationale Treibhausgasbudget für ein 1,5°C-Ziel beträgt ab dem 01.01.2021 somit 2.815,31 Mt CO₂eq.

Emissionsbudget nach Wirtschaftssectoren

Nachdem ein nationales Budget auf Grundlage eines klaren Ziels abgeleitet wurde, wird das Budget nun seinem Handlungsfeld, dem Betrieb und der Konstruktion von Wohnraum, angenähert. In einem ersten Schritt wird das verfügbare absolute Budget von 2.815,31 Mt CO₂eq dabei, ähnlich dem „grandfathering“ Prinzip zur Budgetaufteilung innerhalb der Länder, anteilig nach dem Bedarf einzelner Wirtschaftssectoren aufgeteilt.

Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, teilt das Klimaschutz-Gesetz das nationale Emissionsbudget prozentual auf sechs Wirtschaftssectoren auf und definiert für jeden Sektor einen individuellen Zielkorridor (vgl. Abb. 4 aus Kapitel 2.1.2). Die sektoralen Anteile am Gesamtbudget spiegeln unabhängig von der Zieldefinition, die deutsche Wirtschaft und deren derzeitigen Treibhausgasbedarf je Sektor wider. Sie geben außerdem Auskunft darüber, wie die Bundesregierung das Reduktionspotenzial der einzelnen Wirtschaftsbereiche einschätzt. Werden die Bedarfsanteile aus dem KSG auf das in dieser Arbeit abgeleitete, nationale Treibhausgasbudget übertragen, so können sektorspezifische Budgets unter gleichzeitiger Berücksichtigung aller Sektoren ermittelt werden. Die sektoralen Ziele aus dem KSG sind allerdings nur bis zum Jahr 2030 definiert. In dieser Arbeit wird daher davon ausgegangen, dass ab 2031 die Emissionen jedes Sektors um den gleichen Anteil wie im Jahr 2030 reduziert werden sollen. Der Einfluss der Zieldefinition einzelner Sektoren, sowie der Umgang mit einem unterschiedlich großen

Reduktionspotenzial je Sektor und voraussichtlichen Wirtschaftsentwicklungen, wird in Kapitel 5.1.1 diskutiert. Die Abbildung 16, zeigt die Sektorziele pro Jahr, anteilig übertragen auf das hier definierte Treibhausgasbudget für ein 1,5°C-Ziel.

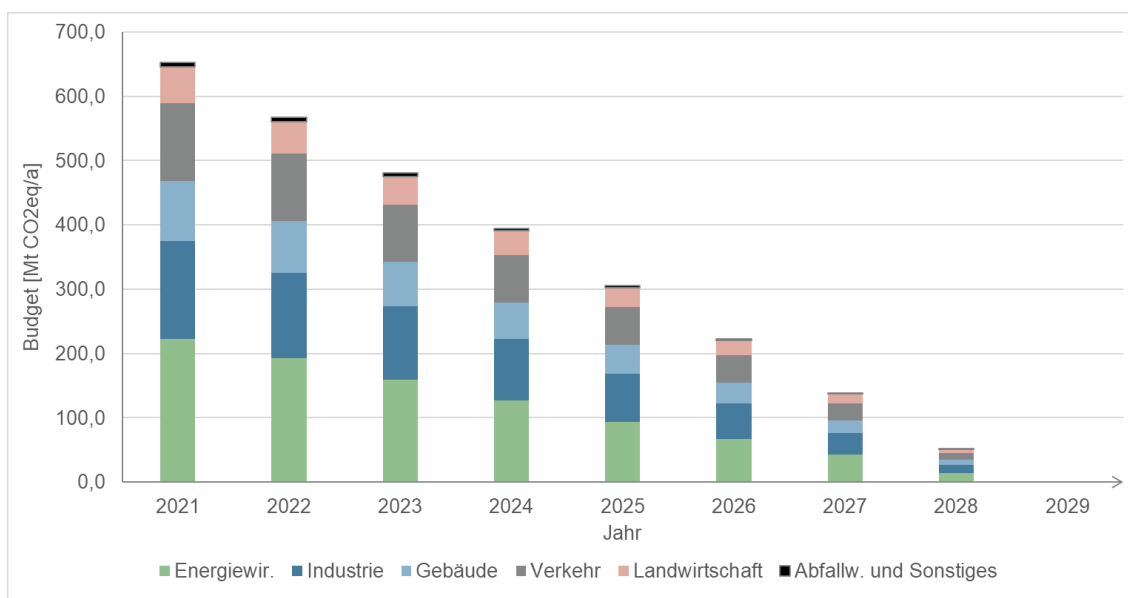


Abbildung 16: Treibhausgasbudget je Sektor für ein 1,5°C-Ziel (eigene Darstellung)

Emissionsbudget für Gebäude

Nachdem ein Treibhausgasbudget je Wirtschaftssektor, mit zuvor genannter Zielsetzung abgeleitet werden konnte, soll nun herausgefunden werden, wie groß der Anteil an Emissionen innerhalb eines Sektors für den Betrieb und die Konstruktion von Wohnfläche ist. Zusammen mit der Aufteilung der Sektoren aus dem vorhergehenden Abschnitt, kann mit den Sektoranteilen des Handlungsfeldes prozentual ein Treibhausgasbudget für den Wohnungsbau, auf Grundlage eines eigen definierten nationalen Gesamtbudgets, ermittelt werden.

Für dieses Vorhaben werden die Wirtschaftssektoren und deren Einfluss auf den Wohnungsbau genauer betrachtet. Dabei wird deutlich, dass der Sektor „Gebäude“ nicht alle Stoffströme der Bauwirtschaft berücksichtigt. Im Sektor „Gebäude“ wird allein die „Verbrennung von Brennstoffen“ in Gebäuden, also die Heiz-, Kühl und Warmwasserenergie, adressiert (KSG, 2021). Die Mehrheit von 66% der Emissionen, für die Nutzung und den Betrieb von Gebäuden entstehen allerdings im Sektor „Energiewirtschaft“ durch die Bereitstellung von Brennstoffen oder Strom (BBSR, 2020). Mit Hilfe von multiregionalen In-und Output Datensätzen von Exiobase konnte die Studie des BBSR (2020) für den

Zeitpunkt des Untersuchungsjahres 2014, die Umweltauswirkungen des Gebäudesektors quantifizieren. Je nachdem welche Rolle ein Sektor über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes spielt und sich in Zukunft entwickeln wird, fällt auch die Größe des noch verfügbaren Emissionsbudgets dieses Handlungsfeldes aus. Nach der Studie des BBSR verteilten sich die Emissionen im Jahr 2014 für die Herstellung, Errichtung und Nutzung von Gebäuden und die Durchführung von Modernisierungen vor allem auf die Sektoren, „Gebäude“, „Energiewirtschaft“ und „Industrie“ (vgl. Abb. 17).

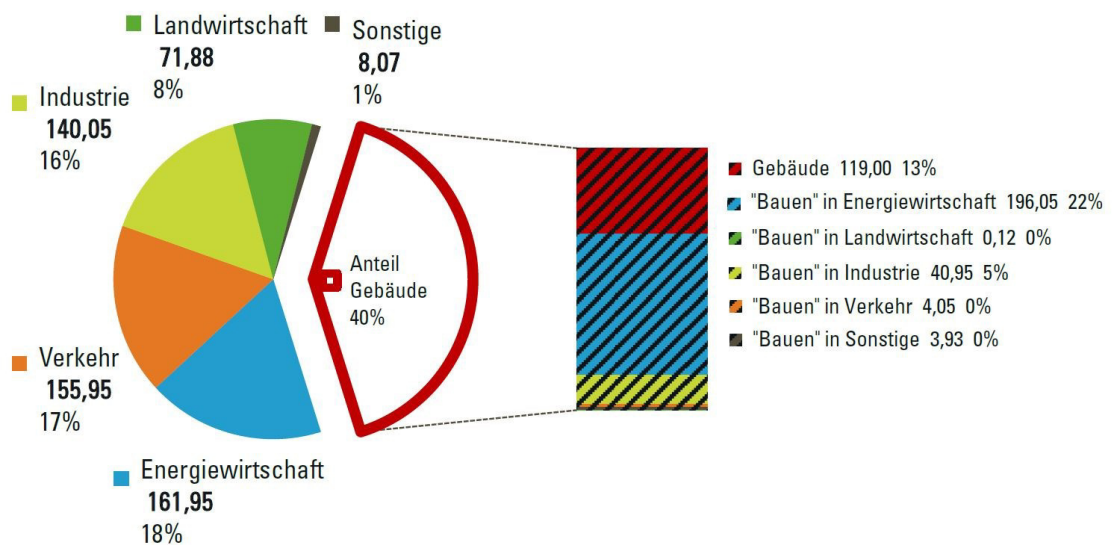


Abbildung 17: Anteile der Treibhausgasemissionen im Hochbau (BBSR, 2020, S. 26, Abb. 8)

Die in Abbildung 17 dargestellte Sektorenaufteilung aus der Studie des BBSR wird im Folgenden dazu verwendet das zuvor abgeleitete, nationale Treibhausgasbudget auf das abgezielte Handlungsfeld zu verteilen. Zwar beinhaltet die Studie einige das Ergebnis beeinflussende Einschränkungen, allerdings fehlt es an vergleichbaren Untersuchungen. Den Einfluss, den die verwendete Studie mit ihren Unschärfen auf das Ergebnis des Treibhausgasbudgets in dieser Arbeit hat, wird in Kapitel 5.1.1 diskutiert. Die Tabelle 1 stellt die Ergebnisse des BBSR für den Betrieb und die Konstruktion von Gebäuden, sowie den daraus abgeleiteten und verwendeten Anteil des Handlungsfeldes am Sektor dar.

Tabelle 1: Sektorale Emissionszuweisung für die Treibhausgasemissionen von Gebäuden (eigene Darstellung auf Datengrundlage von BBSR, 2020)

Handlungsfeld	THG Emissionen gesamt in 2014 (BBSR, 2020)	THG-Emissionen "Nutzung und Betrieb" (BBSR, 2020)	Anteil am Sektor	THG-Emissionen "Herstellung, Errichtung, Modernisierung" (BBSR, 2020)	Anteil am Sektor
Energiewirtschaft	358	180	0,50	16,4	0,046
Industrie	181	0	0,00	41	0,227
Gebäude	119	117	0,98	0	0,000
Verkehr	160	0	0,00	4	0,025
Landwirtschaft	72	0	0,00	0,1	0,001
Sonstige	12	0	0,00	3,9	0,325
gesamt	902	297	0,33	65,4	0,073

Bezugnehmend auf die durch das KSG definierte Aufteilung des Budgets und der prozentualen Zuweisung von Emissionen für Gebäude aus der Studie des BBSR (2020), resultiert für das Handlungsfeld „Betrieb und Nutzung“ ein Treibhausgasbudget von 858,4 Mt CO₂eq, ab dem 01.01.2021. Nach Erkenntnissen des BBSR sind 70% dieser Emissionen auf Wohngebäude zurückzuführen. Das Budget muss somit um 0,7 vermindert werden und beträgt für den Betrieb und die Nutzung für Wohngebäude ab 2021 noch 600,9 Mt CO₂eq. Für das Handlungsfeld „Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohngebäuden“ definiert der BBSR keinen Minderungsfaktor für Wohngebäude. Auf Grundlage genehmigter Gebäude, nach der aktuellsten Erhebung im Jahr 2020 des Statistischen Bundesamtes, wird ein Minderungsfaktor ermittelt (Destatis, 2021a). Der Anteil genehmigter Wohngebäude im Jahr 2020, beträgt somit 54,61 % aller genehmigter Wohn- und Nichtwohngebäude. Die noch verfügbaren Gesamtemissionen für das Handlungsfeld „Herstellung, Errichtung und Modernisierung von Wohngebäuden“ von 433,4 Mt CO₂eq ab 01.01.2018 werden nach dieser Methode zur Minderung auf 236,66 Mt CO₂eq reduziert. Eine Gegenüberstellung von noch vorhandenem Treibhausgasbudget je Handlungsfeld zeigt Abbildung 18 und Abbildung 19.

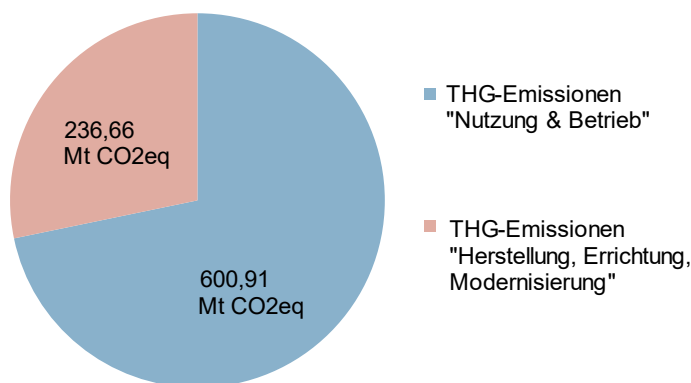


Abbildung 18: Treibhausgasbudget für Wohngebäude je Handlungsfeld (eigene Darstellung)

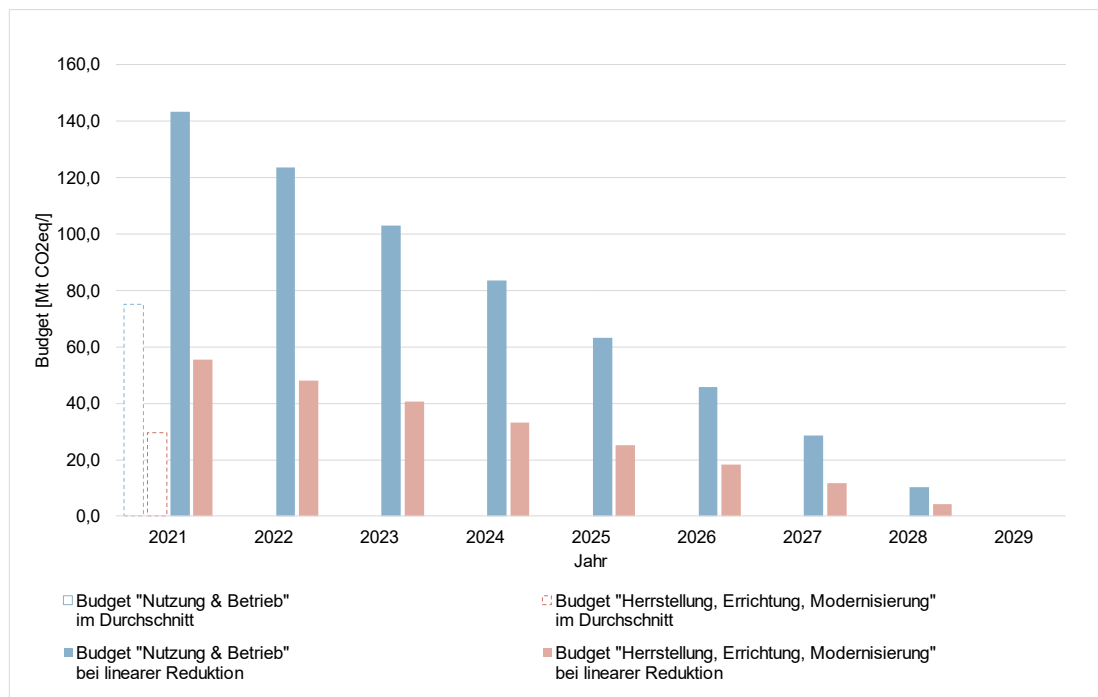


Abbildung 19: Treibhausgasbudget je Handlungsfeld und Jahr bei linearer Reduktion (eigene Darstellung)

Emissionsbudget für Gebäude und Quadratmeter

Dieser Abschnitt beschreibt den letzten Schritt in der Ableitung eines Treibhausgasbudgets für Wohngebäude innerhalb dieser Arbeit. Das ermittelte Treibhausgas-Budget von 600,9 MtCO₂eq für den Betrieb und 236,66 MtCO₂eq für die Konstruktion von Wohngebäuden wird nun weiter differenziert in ein Budget je Quadratmeter Nettogrundfläche. Während zur Definition eines Treibhausgasbudgets je m² Annahmen zum prognostizierten Wohnflächenbedarf in Deutschland notwendig sind, so entscheidet die Wahl eines Reduktionsszenarios über das Budget je m² und Jahr. Das Ergebnis dieser beiden letzten Rechenschritte dient dazu, ein mit der Literatur vergleichbares Budget für Wohngebäude aufzustellen. Diese Art der Budgetdarstellung beinhaltet jedoch weitere Einschränkungen die in Kapitel 5.1.1, sowie 5.1.3 diskutiert sind.

Wie in Kapitel 2.2.3 analysiert, wird die Annahme übernommen, dass ca. 400.000 Wohnungen pro Jahr in Deutschland benötigt werden (Tichelmann et al., 2016). Die durchschnittliche Wohnungsgröße, bezogen auf ganz Deutschland, lag 2018 bei 94,7 m² (Destatis, 2021c). Die Verwendung dieser gemittelten Wohnungsgröße in der Modellrechnung würde allerdings in einem verfälschten Ergebnis resultieren. Aufgrund rückläufiger Nachfrage und verstärktem Remanenzeffekt vergrößert sich in wirtschaftsschwachen und östlichen Regionen die durchschnittliche Wohnungsgröße. Wie in

Kapitel 2.2.2 aufgezeigt, entsteht aber gleichzeitig neuer Wohnraum in den Metropolstädten und wirtschaftsstarken Regionen Deutschlands. Dies hat den Effekt, dass zwar die durchschnittliche Wohnungsgröße in Deutschland steigt, aber die Menschen in Gebieten mit hoher Nachfrage eine viel kleinere Wohnfläche als die Durchschnittswohnfläche zur Verfügung haben. Im Jahr 2018 lag die durchschnittliche Wohnungsgröße in deutschen Metropolstädten im bei $76,3\text{m}^2$ (Statista, 2021b). Multipliziert mit dem jährlichen Wohnungsbedarf, ergibt sich somit ein Wohnflächenbedarf von $30,5$ Mio. m^2 pro Jahr.

Die benötigte Wohnfläche von $30,5$ Mio. m^2 pro Jahr muss für den angestrebten Vergleich mit den Ergebnissen aus der Ökobilanz zur Modellstudie noch in eine gemeinsame Bezugseinheit übersetzt werden. Caala (2016) drückt das Treibhausgaspotenzial in Treibhausgasemissionen je Quadratmeter Nettogrundfläche (NGF) aus. Da der Bezug auf die Nettogrundfläche auch in anerkannten Zertifizierungssystemen wie der DGNB verwendet werden und Ergebnisse somit gut verglichen werden können, eignet sich für diese Arbeit der Bezug des Treibhausgaspotentials auf die Nettogrundfläche besonders. Die Umrechnung von Wohnfläche auf Nettogrundfläche basiert auf Planungskennwerten der Technischen Universität Wien von Prof. Manfred Berthold (Berthold, 2022). Daraus geht hervor, dass die Wohnfläche $96,89\%$ der Nettogrundfläche beträgt. Die genaue Berechnung ist im Anhang A aufgeführt.

Das noch verfügbare nationale Treibhausgasbudget für neuen Wohnraum kann nun mit dem Wissen über den jährlichen Wohnflächenbedarf auf den, in einem bestimmten Zeitraum benötigten Nettogrundflächenbedarf, aufgeteilt werden. Für das verfolgte $1,5^\circ\text{C}$ -Ziel und bei einem linearen Reduktionsszenario, steht für die die Konstruktion noch ein mittleres, jährliches Budget von $1000,41\text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2(\text{NGF})$ bis Anfang 2029 zur Verfügung.

In dem Emissionsbudget für den Betrieb von Wohngebäuden muss, neben dem Betrieb der jährlich hinzukommenden Wohnungen, auch der Betrieb des Wohnungsbestandes berücksichtigt werden. Hierzu werden die Daten des Statistischen Bundesamtes verwendet, welches von einem Wohnflächenbestand von $3,94$ Milliarden m^2 bis Ende 2020 ausgeht (Destatis, 2021d). Daraus folgt, dass zusätzlich zu der jährlich hinzukommenden Wohnfläche von 400.000 Wohnungen, der Basisbetrieb der existierenden Wohnfläche addiert werden muss. Für das definierte Ziel und Reduktionsszenario können für

den Betrieb von Wohngebäuden demnach, zusätzlich zu den grauen Emissionen, jährlich noch 19,21 kgCO₂eq/m²(NGF) bis Anfang 2029 aufgewendet werden.

Die Abbildung 20 zeigt die noch verfügbare Treibhausgasmenge für Wohngebäude pro m² und Jahr, wenn von einem linearen Reduktionsszenario ausgegangen wird. Einerseits wird über die Balken im Diagramm dargestellt wie viel Budget pro Jahr noch vorhanden ist, wenn jedes Jahr weniger Emissionen pro m² verwendet werden dürfen. Das verfügbare Budget kann andererseits aber auch als gemittelter Wert je m² und Jahr ausgewiesen werden. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass das jährlich ausgewiesene Treibhausgasbudget nur bei der hier verwendeten linearen Emissionsreduktion, unter allen benannten Einschränkungen, korrekt ist. Bei einer flacheren Kurve könnte das Budget auch noch länger als bis Ende 2028 ausreichen. Dafür stände aber nicht nur im Startjahr, sondern auch in allen folgenden Jahren weniger Treibhausgasbudget zur Verfügung. Das jährliche Budget würde sich dementsprechend verkleinern. Die Darstellung eines Treibhausgasbudgets für Wohngebäude je Quadratmeter und Jahr hängt also stark vom prognostizierten Wohnflächenbedarf und dem definierten Zeitpunkt der Klimaneutralität ab und ist in Kapitel 5 noch einmal beleuchtet.

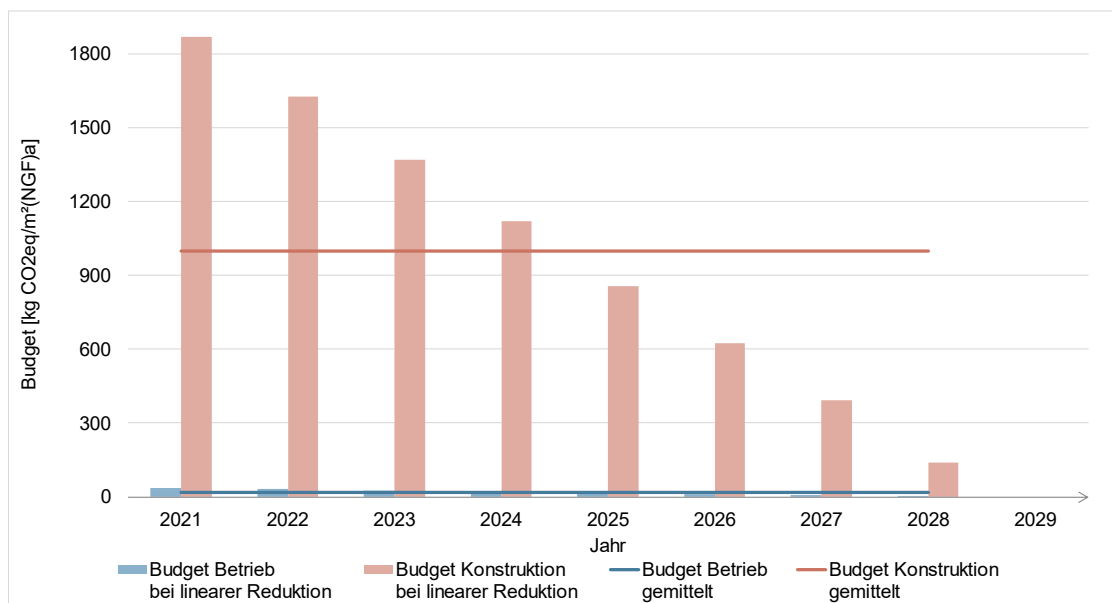


Abbildung 20: Treibhausgasbudget pro m² und Lebensphase/Handlungsfeld eines Gebäudes (eigene Darstellung)

3.2. Baurecht

Baurechtliche Anforderungen bestimmen nicht nur die Realisierbarkeit eines Entwurfes, sondern beeinflussen auch dessen Treibhauspotenzial. Strengere rechtliche Vorgaben, zum Beispiel beim Thema Brandschutz, bedingen oftmals einen größeren Materialeinsatz und spezifische Baumaterialien, welche in der Regel mit höheren Treibhausgasemissionen verbunden sind. Im Folgenden sind die Anforderungen aus dem Baurecht beschrieben, die die Umsetzung von Aufstockungen, insbesondere die Umsetzung der Fallstudie, beeinflussen. Alle hier beschriebenen Anforderungen und die daraus getroffenen Annahmen sind im Bauteilkatalog nochmals übersichtlich aufgeführt (vgl. Anhang C).

3.2.1. Rahmenbedingungen aus dem Bauplanungsrecht

Aus dem Bauplanungsrecht geht hervor, ob die geplante Baumaßnahme am spezifischen Bauplatz grundsätzlich genehmigungsfähig ist. Nachfolgend ist beschrieben, welche Aspekte aus dem Bauplanungsrecht eine besondere Rolle für die zu untersuchende Aufstockung spielen.

Bebauungsplan

Ein Bebauungsplan nach §30 BauGB ist für das Baugrundstück in Kempten nicht vorhanden. Das Grundstück liegt somit nicht im Geltungsbereich eines Bebauungsplans. Es wird daher „im Zusammenhang bebauter Ortsteile“, nach §34 BauGB, verfahren. Der Paragraph regelt Art und Maß der Bebauung, Bauweise und Grundstücksfläche je nach Einfügung in die nähere Umgebung. Das Bauvorhaben muss sich nach diesem Paragraphen in die Umgebungsbebauung einfügen. Aus dem Flächennutzungsplan geht hervor, dass im untersuchten Gebiet Wohnbauflächen vorgeschrieben sind. Das Gebiet grenzt im Norden und Osten an ein Mischgebiet. Im Westen schließt sich ein weiteres Wohngebiet an, während der südliche Grundstücksteil mit dem Campus der Fachhochschule durch ein Sondergebiet begrenzt wird. Der am nächsten angrenzende Bebauungsplan, neben dem Bebauungsplan für das Sondergebiet, befindet sich östlich der einer angrenzenden Hauptstraße. Dort ist die Anzahl der Vollgeschosse auf vier Geschosse begrenzt und ein Walm- oder Satteldach, sowie die geschlossene Bauweise vorgeschrieben. Das betrachtete Gebiet befindet sich aber im Übergang zwischen Wohngebiet und Mischnutzung sowie einem Sondergebiet. Abweichungen von den

Vorgaben des, in nächster Umgebung liegenden Wohngebietes, können somit und aufgrund der Art der Bestandsbebauung höchstwahrscheinlich von den dort festgelegten Anforderungen abweichen. Nach §34 (3a) BauGB hat die Behörde einen Ermessenspielraum, wenn die geplante Baumaßnahme städtebaulich vertretbar und die nachbarlichen Interessen gewürdigt sind. Für die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen einer Aufstockung haben die Vorgaben nach §34 BauGB aber nur wenig Einfluss auf die Ergebnisse. Zur Vereinfachung und besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien wird daher die Annahme getroffen, dass alle Gebäude um ein Geschoss aufgestockt werden können und statt eines Sattel- oder Walmdaches auch ein Flachdach zulässig ist.

Satzungen der Stadt Kempten, wie die Stadtbildsatzung, die Satzung zu Überschwemmungsgebieten und Naturdenkmäler, gelten am zu beplanenden Grundstück nicht. Allein die Satzung zur Sicherstellung des Baubestandes wirkt auf der Grundstücksfläche. Die geltende Bauschutzsatzung hat das Ziel die innerörtliche Durchgrünung und das Ortsbild in ihrer Gestalt zu erhalten, das Mikroklima zu verbessern und das durch vorhandene Begrünung entstandene Ökosystem aufrecht zu erhalten. Es ist daher nicht erlaubt Bäume mit mehr als 80 cm Stammumfang, oder mehrstämmige Bäume mit einem Umfang von 50 cm, von einem der Stämme, zu entfernen, zerstören oder zu verändern. (Stadt Kempten, 2021b) Zwar sind den zur Verfügung gestellten Unterlagen zu entnehmen, dass die meisten Bäume auf dem Untersuchungsgebiet nach der Bauschutzverordnung geschützt sind. Die Satzung hat aber dennoch keinen oder nur einen geringen Einfluss auf den Entwurf der Aufstockung, da hier nur die vorzuhaltenden Flächen für die Feuerwehr von dieser Vorschrift beeinflusst sind. Für die Realisierung einer Aufstockung, bei welchem der zweite Rettungsweg über Hubrettungsfahrzeuge der Feuerwehr gesichert ist, muss die Lage der Bäume noch einmal im Detail geprüft werden.

Aus dem Bauplanungsrecht heraus ist für den Entwurf der Fallstudie zusammenfassend sicherzustellen, dass durch die Aufstockung der Kontext des Ortsteils nicht gestört wird und wichtige Bepflanzung auf dem Grundstück erhalten bleibt.

3.2.2. Rahmenbedingungen aus dem Bauordnungsrecht

Aus dem Baurecht heraus sind es insbesondere die baulich-technischen Anforderungen des Bauordnungsrechts an das Gebäude, welche den Bedarf an Treibhausgasemissionen für Baumaßnahmen beeinflussen. Das Wissen über den Handlungsspielraum

Durchführung der Fallstudie

innerhalb der einzelnen Aspekte aus dem Bauordnungsrecht ermöglicht es somit die Aufstockung, im Rahmen der zulässigen Möglichkeiten, emissionsarm zu planen. In diesem Abschnitt werden daher die baulich-technischen Anforderungen an die Aufstockung für die Fallstudie herausgearbeitet.

Bestandschutz

Für die Fallstudie, aber auch für Aufstockungen im Allgemeinen, ist die Frage nach einem noch bestehenden Bestandsschutz wesentlich. Ist der Bestandsschutz erloschen, müssen der Bestand, als auch die neue bauliche Maßnahme, den aktuellen baulichen Anforderungen entsprechen. Errichtete Gebäude stehen grundsätzlich unter Bestandsschutz, wenn das Gebäude bauaufsichtlich genehmigt und, oder genehmigungskonform errichtet wurde. Es werden dabei der passive und der aktiven Bestandsschutz unterschieden. Der passive Bestandsschutz basiert auf Art. 14 des Grundgesetzes (GG) und schützt den Bestand vor nachträglichen, gesetzlichen Anforderungen. Der aktive Bestandsschutz versichert dem Eigentümer des Gebäudes solche Maßnahmen zu ergreifen, die das Gebäude erhalten. Unterhaltungs-, Instandsetzungs-, und Modernisierungsmaßnahmen sind durch den Bestandsschutz gedeckt. Bei wesentlichen Veränderungen, die beispielsweise Baukosten übersteigen, die ein vergleichbarer Neubau hervorbringen würde, erlischt der Bestandsschutz. Ebenso die Notwendigkeit einer gesamtheitlich statischen Neuberechnung, oder eine Nutzungsänderung führen dazu, dass der Bestandsschutz endet (Müller, 2015, S. 34). Der Bestandsschutz erlischt auch, sobald eine unrechtmäßige Änderung der Gebäudekonstruktion vorgenommen wurde, oder erhebliche Gefahren für Leben und Gesundheit entstehen. Da sich bei Aufstockungen in der Regel auch die Gebäudeklasse ändert, ist aber damit zu rechnen, dass der Bestandsschutz nicht erhalten bleibt (Fath et al., 2019, S. 52). In der vorliegenden Fallstudie ändert sich mit der Aufstockung die Gebäudeklasse. Es wird daher davon ausgegangen, dass der Bestandsschutz erlischt.

Abstandsflächen

Abstandsflächen nach BayBo Art.6 sollen eine ausreichende Belichtung und Belüftung, den Brandschutz und einen ausreichenden Sozialabstand sicherstellen (Müller, 2015, S. 26). Da sich durch eine Aufstockung auch die Kubatur und Höhe des Bestandes ändert, sind Abstandsflächen im Entwurfsprozess ein wichtiger Parameter für die Realisierbarkeit des Entwurfs.

Die Festsetzung zum Ausmaß der Abstandsflächen, sowie der allgemeinen brand-schutztechnisch notwendigen Mindestabstände sind in der LBO des jeweiligen Bundeslandes geregelt. In Bayern werden diese in der Bayrischen Bauordnung (BayBO) insbesondere in Art.6 BayBO (BayBO, 2021), und über die Gebäudeklasse, in Art.2 (3) BayBO, festgelegt. Nach Art.6 BayBO richtet sich die Berechnung der Abstandsflächen allgemein nach der Summe der Wandhöhe und einer Teilhöhe des Daches. Die Abstandsflächen müssen, abgesehen von Ausnahmen, auf dem Grundstück liegen und dürfen sich nicht überdecken. Die Neuerungen der BayBO erlauben seit dem 01.02.2021 eine Reduktion der Abstandsflächen bei Gemeinden mit weniger als 250.000 Einwohner (BYAK, 2021). Nach Art.6 (5) BayBO wird die ermittelte Gesamthöhe mit dem Faktor 0,4, statt wie vorher mit dem Faktor 1 multipliziert. Es muss jedoch mindestens eine Abstandsfläche von 3 m eingehalten werden. Das betrachtete Gebäude in Kempten hat eine anrechenbare Wandhöhe von 10,5 m und eine anrechenbare Dachhöhe von einem Meter. Daraus ergibt sich eine Abstandsflächentiefe von 4,3 m längs und 4,2 - 4,6 m quer zum First. Wenn, wie in der Fallstudie, um ein Geschoss mit Flachdach aufgestockt wird, erhöhen sich die Abstandsflächen des Hauptgebäudes auf 4,88 m und die des neu hinzukommenden Treppenhauses auf 5,17 m. Jedes weitere Geschoss würde die Abstandsflächen um circa 1,2 m erhöhen.



Abbildung 21: Abstandsflächen am Standort in grau gestrichelter Linie (eigene Darstellung)

Werden die Abstandsflächen für den Entwurf der Fallstudie auf den Lageplan übertragen, so überdecken sich die benötigten Abstandsflächen nicht (vgl. Abb. 21). Eine eingeschossige Aufstockung am Standort ist, hinsichtlich der Abstandsflächen, demnach zulässig.

Standsicherheit

Damit eine genehmigungspflichtige Baumaßnahme, wie auch die hier untersuchte Fallstudie, zulässig ist, muss im Allgemeinen ein Nachweis zur Standsicherheit vorgelegt werden. Nach der BayBO Art.62a Abs.2 muss der Standsicherheitsnachweis ab Gebäudeklasse 4 von einem vereidigten Prüfsachverständigen bescheinigt sein. „Jede bauliche Anlage muss im Ganzen, in ihren einzelnen Teilen und für sich allein standsicher sein“ schreibt die BayBO in Art.10 Satz 1 vor, aber gilt nach der MBO §12 Abs. 1 Satz 1 genauso für alle Bundesländer. Somit muss der Nachweis der Standsicherheit bestehende Bauteile des Bestandes, als auch die neuen Bauteile der Aufstockung umfassen.

Die Standsicherheit der Modellstudie wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht nachgewiesen. Grundsätzlich wird angenommen, dass durch die Verwendung von Holz in der Konstruktion nur eine geringe Eigenlast hinzukommt. Auch die zusätzliche Verkehrslast wird als gering eingeschätzt, da die untersuchte Aufstockung nur zum Wohnen genutzt werden soll. Da das Baugebiet sich in einem Stadtgebiet mit der Geländekategorie IV und zusätzlich in einer Region mit geringen Windgeschwindigkeiten, Windzone 1, befindet, wird auch von einer geringen Windlast ausgegangen. Die Schneelast wird allerdings als erhöht eingestuft. Das Baugebiet befindet sich in der Schneelastzone 3, welches die ertragsreichste Schneezone in Deutschland darstellt. Das Tragsystem und die Annahmen zu dessen Dimensionierung, sind in Kapitel 3.3.2 nochmals aufgegriffen und im Anforderungskatalog im Anhang B zusammengefasst.

Brandschutz

Der Brandschutz beeinflusst die Treibhausgasemissionen für Aufstockungen ganz besonders. Mit einer Aufstockung werden Rettungswege länger, der Brand in höheren Geschossen ist schwerer zu erreichen und die Anzahl der zu rettenden Personen erhöht sich in der Regel. Um den Schutzziele des Brandschutzes nachzukommen, werden häufig emissionsintensive Nachrüstungsmaßnahmen und Ausführungen benötigt. In den folgenden Abschnitten ist herausgearbeitet, welche brandschutztechnischen Anforderungen beim Entwurf für die Aufstockungsmaßnahme voraussichtlich eingehalten

werden müssen. Beginnend mit den Schutzziele des Brandschutzes, werden über die Definition der Gebäudeklasse und mit Hilfe der Holzbaurichtlinie Anforderungen zur geplanten Aufstockung in Holzbau festgesteckt und Annahmen abgeleitet.

Nach Art. 12 der BayBO, bzw. §14 der MBO, sind „bauliche Anlagen [...] so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“ Diese Schutzziele des Brandschutzes müssen über Vorgaben aus den Landesbauordnungen an das Gebäude und die Bauteile umgesetzt werden. Von den Anforderungen aus der jeweiligen Landesbauordnung an das Gebäude, kann abgewichen werden, wenn nach Art. 63 BayBO, unter „Berücksichtigung des Zwecks“ der jeweiligen Anforderung, die „öffentlich-rechtlichen nachbarlichen Belange“ und die allgemeinen Anforderungen an Gebäude nach Art. 3 BayBO gewährleistet sind. Alternativ kann ein Brandschutznachweis von einem Prüfsachverständigen vorgelegt werden, welcher bestätigt, dass der Brandschutz als Gesamtkonzept funktioniert. Die Genehmigung der Abweichungen muss aber immer durch die Bauaufsichtsbehörde anerkannt werden. (Fath et al., 2019, S. 85). Da im Rahmen der Fallstudie aber kein Brandschutznachweis unter Rücksprache mit einem Prüfsachverständigen durchgeführt werden kann, wird nicht von den Anforderungen aus der Holzbaurichtlinie, welche in die BayBO integriert ist, abgewichen.

Brandschutz - Gebäudeklassen

Um die brandschutztechnischen Anforderungen eines Bauvorhabens zu bestimmen, muss das Gebäude zuerst in eine Gebäudeklasse eingestuft werden. Die Höhe des Gebäudes wird nach Art. 2 Abs. 3 Satz 2 von der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses eines Aufenthaltsraumes bis zur mittleren Geländeoberfläche definiert. Die neuen Anforderungen an den Brandschutz, die sich bei Änderung der Gebäudeklasse ergeben, gelten dabei sowohl für die Aufstockung als auch für den Bestand. Beim untersuchten Gebäude ändert sich die Gebäudeklasse von GKL 3 zur GKL 4, da, mit der Aufstockung um ein Geschoss, neue Aufenthaltsräume geschaffen werden und sich somit die oberste Geschossdecke auf einer Höhe von 8,12 m befindet.

Aus der Gebäudeklasse heraus, ergibt sich sofort eine wesentliche Anforderung an den Gebäudeentwurf. Die Forderung nach zwei unabhängigen Rettungswegen, ist zwar unabhängig von der Gebäudeklasse, die Art der Ausführung dieser jedoch nicht. In der

Durchführung der Fallstudie

Gebäudeklasse 4, oder bis zu einer Brüstungshöhe von 23 m, wird ein baulicher Rettungswege gefordert, während der zweite Rettungsweg auch über anleiterbare Fenster hergestellt werden darf. Dafür werden ab einer Brüstungshöhe von über 8 m Hubrettungsfahrzeuge benötigt. Im Fallbeispiel führt der erste Rettungsweg über das bestehende Treppenhaus, bzw. auf der Nordhälfte über das neue Treppenhaus. Der zweite Rettungsweg wird nicht baulich hergestellt. Für die Feuerwehr müssen für das untersuchte Fallbeispiel demnach geeignete Zufahrten und Aufstellflächen für die benötigten Hubrettungsfahrzeuge vorhanden sein.

Zusätzlich zu den Rettungswegen werden nach Art. 37, Abs.4 BayBO ab einer Höhe von 13 m, was der Gebäudeklasse 5 entspricht, Aufzüge in ausreichender Anzahl benötigt. Im Fallbeispiel dieser Arbeit liegt die Fußbodenoberkante der obersten Aufenthaltsräume unter 13 m, weshalb aus brandschutztechnischer Sicht kein Aufzug benötigt wird. Außerdem erlaubt Satz 5 aus diesem Artikel eine Erleichterung für Aufstockungen. Im Zuge einer Aufstockungsmaßnahme müssen keine Aufzüge errichtet werden, wenn diese nur mit unverhältnismäßigem Aufwand hergestellt werden können. Allerdings müssen nach Art. 48, Abs.1, Satz 2 BayBO in Gebäuden mit mehr als zwei Wohnungen, ein Drittel aller Wohnräume barrierefrei erschlossen sein. Da das Gebäude der Modellstudie keinen barrierefreien Zugang besitzt, macht Art. 48, Abs.1 BayBO eine Aufzugsanlage notwendig.

Zusammenfassend lässt sich das Gebäude durch die Aufstockung in die Gebäudeklasse 4 einordnen. Während die Vorhaltung der Aufstellflächen für die Feuerwehr in dieser Studie keinen Einfluss auf die Emissionen der Aufstockung hat, da für die Ökobilanz die Außenanlagen nicht bilanziert werden. So bedeutet der notwendige bauliche Rettungsweg mit Aufzugsanlage einen erheblichen baulichen Aufwand, der sich auch in den Ergebnissen der Ökobilanz widerspiegelt.

Brandschutz - Brennbarkeit von Materialien und Bauteilen

Mit dem Bestreben die CO₂-Emissionen der Konstruktion auf ein Minimum zu reduzieren, wird im durchgeführten Modellprojekt Holz verwendet. Die Brennbarkeit von Holz stellt aus brandschutztechnischer Sicht jedoch eine besondere Schwierigkeit dar, insbesondere wenn der Feuerwiderstand von Bauteilen hoch feuerhemmend oder sogar feuerbeständig sein soll.

Grundsätzlich unterscheidet die MBO, bzw. die BayBO in Art. 24, Baumaterialien in nicht brennbar, schwerentflammbar und normal entflammbar, wohingegen Bauteile eine feuerbeständige, eine hoch feuerhemmende oder eine feuerhemmende Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen. Gleichzeitig zur Feuerwiderstandsfähigkeit regelt die nationale DIN 4102-2 je Feuerwiderstand auch die zugehörige Feuerwiderstandsdauer (F-30, F-60, F-90). Diese wird aber von der international geltenden EU-Regelung, der DIN EN 13501-2, abgelöst. Die EU-Norm schreibt den Bauteilen noch weitere Leistungskriterien zur Tragfähigkeit (R), zum Raumabschluss (E) und zur Wärmedämmwirkung (I) zu. Die zur Anwendung kommenden Bauteile müssen, die in der Landesbauordnung geforderten Eigenschaften, aufweisen und durch einen anerkannten Nachweis zertifiziert sein.

Insbesondere für den Holzbau stellten die Anforderungen an die Baumaterialien und Bauteile eine Herausforderung dar. Mit der neuen BayBO vom Mai 2021 wird die Verwendung von Holz jedoch erleichtert. Vor der Überarbeitung der BayBO mussten hochfeuerhemmende und feuerbeständige Bauteile in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Die neue Ergänzung in Art.24 Abs.2 Satz 4 und 5 lässt eine Abweichung zu, „sofern sie den Technischen Baubestimmungen nach Art. 81 a entsprechen“. Die Novellierung der bayrischen, technischen Baubestimmung (BayTB) im April 2021, verweist daraufhin auf die neue Muster-Holzbaurichtlinie (MHolzBauRL). Die Holzbaurichtlinie umfasst, anders als die vorher geltende Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hoch feuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (MHFHHolzR) nun allgemein Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 in Holzbauweise. Die Richtlinie eröffnet die Möglichkeit auch feuerbeständige Bauteile aus Holz herzustellen, sobald die Nutzungseinheiten über 200m² messen. Zudem wird die Anwendung der Holzständerbauweise erleichtert dadurch, dass die Konstruktion vereinfacht in Tabellen klassifiziert ist und die Konstruktion auch auf der Baustelle gefertigt werden kann. Zu beachten ist allerdings, dass Wände, an die Anforderungen einer Brandwand gestellt sind, oder, die anstelle von Brandwänden zulässig sind, weiterhin nur aus nichtbrennbaren Baustoffen hergestellt werden dürfen. (Battran, 2021)

Unter Berücksichtigung der BayBO und der MHolzBauRL ergeben sich für die Gebäudeklasse 4, aus der Fallstudie, Anforderungen an die einzelnen Bauteile. So müssen alle tragenden Bauteile, sowie Decken dem Kriterium R60 mit zusätzlichem Kapselkriterium, K₂60, entsprechen. Trennwände sollen mit der Anforderung EI60+K260 hergestellt werden, während Wände notwendiger Treppenträume noch zusätzlich mechanisch beanspruchbar sein müssen. Das Dach muss als harte Bedachung ausgeführt sein.

Hohlböden, mit einer maximalen Hohlraumhöhe von 30 cm im Lichten müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen, es sei denn ein mindestens 3 cm starker Estrich verhindert die Brandausbreitung der normal entflammbaren Unterkonstruktion. Die genauen Anforderungen an die jeweiligen, verwendeten Bauteile sind im Anforderungskatalog aus dem Anhang B, mit dem zugehörigen Abschnitt in der BayBO aufgeführt.

Brandschutzanforderungen an Leitungsanlagen und Installationsschächte sind in der Fallstudie nicht detailliert ausgeführt. Nach Art.38 BayBO, müssen sie aber in kritischen Bereichen, wie in notwendigen Fluren und Treppenhäusern mit erhöhten Brandschutzanforderungen ausgeführt werden. Genauso schreibt Art.39 BayBO den besonderen Umgang mit Lüftungsanlagen vor. Neben generell benötigten elektrischen Leitungen, Rohrleitungen und Installationsschächten innerhalb eines Gebäudes, ist für die Fallstudie auch eine Lüftungsanlage geplant. Im Entwurf ist insbesondere für Lüftungskanäle auch der notwendige Platz im Hohlraumboden für diese vorgesehen, sie wird aber in der folgenden Ökobilanzierung nur pauschal berechnet und deshalb hier nicht weiter ausgeführt.

Wärmeschutz

Der Wärmeschutz, zusammen mit dem Heiz- und Kühlsystems, sowie dem Energieträger haben einen entscheidenden Einfluss auf den Treibhausgasbedarf von Gebäuden. Somit kann über die Entscheidung zu einem optimalen Energiestandard für die Fallstudie das Treibhauspotenzial erheblich verringert werden.

Aufgrund des hohen Einflusses des Energiebedarfs im Betrieb auf die Treibhausgasemissionen, hat der Bund die Musterbauordnung §15 (1) konkretisiert und die Energieeinsparverordnung (EnEV) erlassen. Seitdem wurde die EnEV laufend novelliert und zuletzt am 1. November 2020 durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG) abgelöst. Mit der Einhaltung der GEG oder eines besseren Energiestandards kann auch in der Fallstudie das Treibhauspotenzial erheblich beeinflusst werden. Wie auch mit der EnEV, wenn keine zusätzliche, neue Heizungsanlage notwendig ist, gelten auch mit der GEG vereinfachte Bedingungen an die Aufstockung inklusive des bestehenden, erweiterten Gebäudes. In Teil 3, Abschnitt 1, §51 regelt die GEG „die Anforderungen an [die Energieeffizienz an] ein bestehendes Gebäude bei Erweiterung und Ausbau“. Solange keine eigene Heizung eingebaut wird, darf bei Wohngebäuden „der spezifische [...] Transmissionswärmeverlust der Außenbauteile der neu hinzukommenden [...] Räume das 1,2 fache des entsprechenden Wertes des Referenzgebäudes nicht überschreiten.“ Das

Referenzgebäude wird in Anlage 1 der GEG geregelt. Bei Nutzflächen die 50 m² überschreiten müssen zudem die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz eingehalten werden.

Die Forschungsfrage dieser Thesis zielt aber insbesondere darauf ab, ob es möglich ist, einerseits unter Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften und andererseits mit der, nach aktueller Forschung, treibhaus-reduziertesten Bauweise, genügend Wohnraum innerhalb des verfügbaren CO₂-Budgets zu schaffen. Statt der Referenzausführung aus Anlage 1 der GEG, wird daher ein durch Studien belegter, optimaler Energiestandard, hinsichtlich Treibhausgasemissionen, angestrebt. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile sind somit am Passivhausstand orientiert. Auch die Luftdichtigkeit und Verluste durch Wärmebrücken, sowie die Anlagentechnik sind nach den Vorgaben für ein Passivhaus ausgerichtet. Die genauere Ausführung und Grundlage dieser Entscheidung ist in Kapitel 3.3 beschrieben.

Schallschutz

Der Schallschutz spielt für die Fallstudie nur eine untergeordnete Rolle. Dennoch haben akustisch optimierte Bauteile oft einen höheren Materialverbrauch, was in der Regel mit der Freisetzung von Treibhausgasen verbunden ist.

Der Schallschutz verfolgt einerseits das Ziel, Lärm von außen in den Innenraum zu mindern und andererseits die Lärmübertragung zwischen den Innenräumen auf ein Minimum zu begrenzen. Baurechtlich ist der Schallschutz sehr allgemein gehalten. In der Rechtsprechung ist bei Aufstockungen in der Regel lediglich das Trittschalldämmmaß zwischen dem neuen Geschoss und dem Bestand relevant. Während der Schallschutz sorgfältig geplant werden muss, ist vor allem die korrekte Ausführung der Baukonstruktionen und -fügungen von entscheidender Bedeutung für die Qualität des Schallschutzes.

Der Schallschutz wird in dieser Arbeit nicht detailliert berechnet, dennoch orientieren sich die Bauteilaufbauten an den Mindestanforderungen aus der Tabelle 2 der DIN 4109-1. Demnach muss im Holz-, Leicht- und Trockenbau oder bei baulichen Änderungen an Gebäuden mit einem Baujahr vor Juli 2016 ein Trittschalldämmmaß von $L'_{n,w} \leq 53$ dB eingehalten werden. Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß, R'_w , soll ≥ 54 dB sein. Zwischen Wohnungstrennwänden oder zu Hausfluren soll auch ein R'_w -Wert von ≥ 53

dB eingehalten werden. Weitere Annahmen zum Schallschutz sind dem Anforderungskatalog im Anhang B zu entnehmen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Annahmen aus dem Baurecht als wichtige Grundlage und Handlungsspielraum beim Entwurf für die Fallstudie ableiten. Bauplanungsrechtlich muss nach §34 BauGB verfahren werden, da kein Bebauungsplan für das Grundstück der Fallstudie existiert. Zusätzlich zur Zulässigkeit innerhalb der im Zusammenhang bebauten Ortsteile, muss Rücksicht auf die Baumsatzung der Stadt Kempten genommen werden. Bauordnungsrechtlich erlischt für die geplante Aufstockungsmaßnahme der Bestandsschutz, spätestens durch die Änderung der Gebäudeklasse. Mit zusätzlichem Geschoss wird das Gebäude in die GKL 4 eingeordnet. Die geforderten Abstandsflächen für eine eingeschossige Aufstockung können eingehalten werden. In der Gebäudeklasse 4 muss der erste Rettungsweg baulich hergestellt werden, der zweite wird im konkreten Fallbeispiel über die Fenster und mit Hilfe von Hubrettungsfahrzeugen sichergestellt. Da die Aufstockung als Holzbau geplant ist, muss beim Brandschutz zudem die neue Muster-Holzbaurichtlinie beachtet werden. Zur Sicherung der Barrierefreiheit, von einem Drittel aller Wohnungen, ist eine Aufzugsanlage notwendig. Im Kapitel 3.3 zur Baukonstruktion wird näher auf den Wärme- und Schallschutz, sowie das Tragwerk der Fallstudie eingegangen. In diesem Kapitel konnte jedoch herausgefunden werden, dass die GEG, aufgrund ambitionierterer Wärmeschutzziele in dieser Arbeit, nicht zur Orientierung dient. Zudem sind die Annahmen zur Standsicherheit und zum Schallschutz von einem Fachplaner zu überprüfen, da innerhalb dieser Arbeit, statt genauer Berechnungen, Standardausführungen verwendet werden.

3.3. Baukonstruktion

Die Aufstockung im Fallbeispiel ist so geplant, dass nach heutigem Stand möglichst geringe Treibhausgasemissionen entstehen. Die emissionsarme Aufstockung soll damit die untere Grenze eines Emissionsbedarfs markieren, bis zu welcher es heute möglich ist Wohnraum zu schaffen. Anschließend an die herausgearbeiteten, baurechtlichen Anforderungen an die Aufstockung, entsteht in diesem Kapitel nun der konkrete Entwurf für das Fallbeispiel.

In Hegger et al. (2007, S. 82–109) werden generelle, baukonstruktive Anforderungen an ein Gebäude aufgestellt. Der Entwurf eines Gebäudes setzt diese Anforderungen in konkrete Maßnahmen um. Zur Übersichtlichkeit werden den entwurfsbestimmenden Überpunkten für die Fallstudie, die dabei im Fokus stehenden Anforderungen zugeordnet (vgl. Abb. 22). Entscheidungen, die zu den Überthemen energetisches Niveau, Gebäudetechnik, Baustoffauswahl und Bauweise getroffen werden, sind vor dem Hintergrund der in Kapitel 2.3.2 zusammengefassten Variablen für die ökologische Nachhaltigkeit von Gebäuden getroffen.

Alle Annahmen zu den einzelnen Anforderungen, die im Folgenden getroffen werden, basieren auf Studien und Vergleichswerten. Sie dienen als Grundlage zur Berechnung der Treibhausgasemissionen und sind Durchschnittswerte. Das Optimum eines Entwurfs ist aber abhängig von vielen Faktoren und komplexen Wechselwirkungen, die hier nicht im Detail berücksichtigt werden können. Mit der Fallstudie ist ein Status quo festgelegt, der themenspezifisch von Experten optimiert werden sollte.

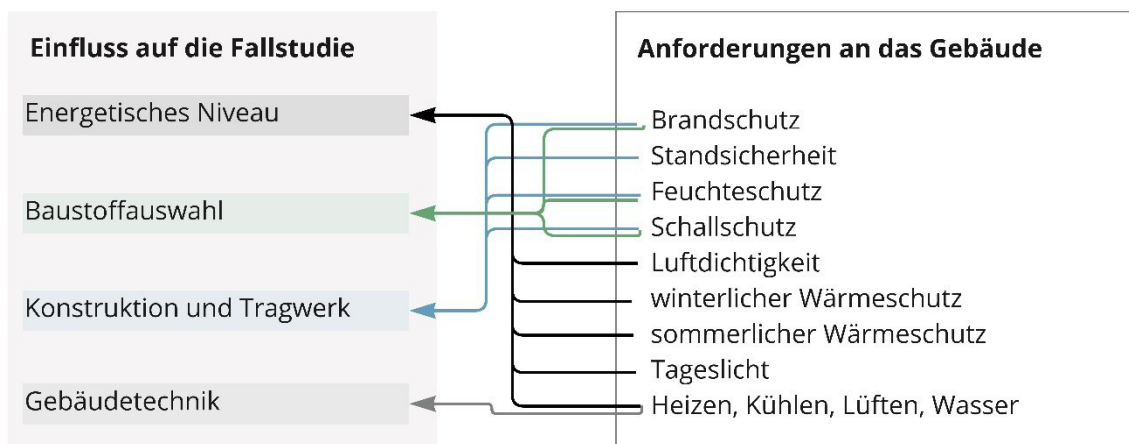


Abbildung 22 - Gruppierung von Gebäudeanforderungen (eigene Darstellung)

3.3.1. Rahmenbedingungen aus dem Bestand

Die Bestandsaufnahme in diesem Kapitel ist wichtig, um die Machbarkeit und den Ressourceneinsatz einer Aufstockung abschätzen zu können. Je nach gewünschtem Standard benötigen Ertüchtigungen viele Ressourcen, oder das Schaffen von Wohnraum ist je nach Bausubstanz gar nicht erst möglich. Die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Merkmale eines Nachkriegsbaus, treffen vielfach auch auf das untersuchte Gebäude in Kempten zu. Informationen, die zur Einordnung des Gebäudes in Kempten dienen und sich nicht aus der vorliegenden Bauakte erschließen lassen, werden mithilfe von Giebeler et al. (2008), Ahnert und Kraue (2009) und Loga et al. (2015) ergänzt. Insbesondere die Standsicherheit und Statik des Bestandes spielt hinsichtlich der Materialwahl und dem Anschluss an die oberste Geschossdecke für die Ausführung der Fallstudie eine Rolle. Die folgende Bestandsaufnahme fokussiert sich deshalb auf Aspekte, die für den Entwurf der Aufstockung relevant sind. Der Einfluss auf eine Bestandssanierung, die im Zuge der Aufstockung in der Praxis voraussichtlich durchgeführt werden würde, wird hierbei zunächst vernachlässigt.

Im untersuchten Gebäude in Kempten, misst die lichte Raumhöhe nur 2,3 m, was typisch für diese Bauzeit ist. Die tragenden Außenwände bestehen gemäß Bauakte im Kellergeschoss aus 40 cm starken Stampfbetonwänden, ohne erkennbare Abdichtung. Im Erdgeschoss sind sie aus Hohllochziegeln mit Kalkzementmörtel und messen 30 cm. Die darüber liegenden Außenwände aus Bimshohlblocksteinen, sind im ersten und zweiten Obergeschoss 30 cm und im Dachgeschoss 24 cm stark. Eine 24 cm starke Innenwand längs zur langen Gebäudekante leitet Kräfte auf die Mittelpfette aus dem Dach ab. Zwischen den Wohnungen befinden sich weitere Ziegelmauerwerkswände mit der gleichen Abmessung wie die Längswand. Sie dient, neben ihrer tragenden Eigenschaft, vermutlich außerdem als Wand mit erhöhten Brandschutzanforderungen zwischen Nutzungseinheiten. Dabei weisen diese Innenwände zusätzlich einen verbesserten Schallschutz, im Vergleich zu den schlankeren, nicht tragenden Innenwänden aus Schwemmstein auf. Die tragenden Innenwände aus Ziegelmauerwerk als Hohllochziegel 150 im Erdgeschoss, beziehungsweise Hohllochziegel 100 in den Obergeschossen entsprechen den heutigen Druckfestigkeitsklasse 8 und können daher geringe Zusatzlasten aufnehmen (Meyer & Gierga, 2012). Da in der Bauakte keine Information zu den genauen Eigenschaften der erwähnten Bimshohlblocksteine zu finden sind, wird davon ausgegangen, dass es sich um Bimsbetonhohlblocksteine handelt. Dabei wird der natürlich vorkommende Bimsstein als Zuschlagsstoff des Betons verwendet und bei der

Herstellung von Hohlblocksteinen in innen hohle Formen gegossen (Grimm, 2019). Materialeinsparungen durch schlankere Querschnitte, die infolge der guten Dämmeigenschaften, aber auch aufgrund einer erheblichen Reduktion des Eigengewichts möglich waren, machten dieses Baumaterial in den 50er Jahren besonders interessant. Allerdings ist die Festigkeit von Bimsbetonhohlsteinen eher gering, weshalb zusätzliche Lasten durch Aufstockung möglicherweise nur bei zusätzlicher Ertüchtigung oder tragwerksunterstützender Maßnahmen umzusetzen sind. Nach DIN 18151 variiert ihre Steindruckfestigkeit bei 30 cm Breite zwischen 25-50 kg/cm² (2,45 -5 N/mm²), welche der heutigen Festigkeitsklasse 4-6 entspricht. Im Vergleich dazu hat ein moderner Hochlochziegel mit 38 cm Breite eine Steindruckfestigkeit von 11,5-14,2 kN/mm² (Gangoly et al., 2018, S. 23).

Obwohl zu erwarten ist, dass die Wände im Fallbeispiel keine zusätzlichen Lasten aufnehmen können, wird der Ansatz der Deutschlandstudie weiterverfolgt. Diese kommt zum Ergebnis, dass für mehrgeschossigen Mehrfamilienhäuser aus den Baujahren von 1950 bis 1989 die konstruktiven Voraussetzungen für Aufstockungsmaßnahmen erfüllt sind (Tichelmann et al., 2016, S. 33). Die Studie trifft die Annahme, dass die bauliche Substanz der Gebäude schadens- und mängelfrei ist. 85% bis 90% der dabei untersuchten Bestandsgebäude haben das Potential eingeschossig aufgestockt werden zu können. Für eine zweigeschossige Aufstockung würde nur 35% bis 45% des Bestandes in Frage kommen. Auch wenn im Mittel, nach Tichelmann et al. (2016, S. 26), 1,3 Geschosse aufgestockt werden können ist nach der Bestanduntersuchung am Beispiel Kempten zu erwarten, dass nur maximal ein Geschoss ohne Ertüchtigung möglich ist. Bei einer eventuell notwendigen Ertüchtigung des Bestands müsste noch zusätzlich beurteilt werden, ob eine Aufstockung auch unter wirtschaftlichen Kriterien sinnvoll ist. Dabei könnte sich ergeben, dass nur eine mehrgeschossige Aufstockung, den Aufwand der Ertüchtigung amortisieren würde.

Die Decken des Gebäudes in Kempten sind als Hohlkörperdecken im Remy-Decken-System ausgeführt und um einen 5 cm starken Aufbeton ergänzt. Die Remy-Decke besteht in der Regel aus Schlacken- oder Bimsbetonkörpern mit einer Stärke von 12-34 cm und einem Rippenabstand von oftmals 50 cm. Die Hohlkörper werden vor Ort mit Beton vergossen. (Ahnert & Krause, 2009, S. 180; Giebeler et al., 2008, S. 182)

Aus den Plänen ist nicht ersichtlich welche Deckenstärke genau vorliegt. Es wird jedoch von einer Rohdeckenstärke von 25 cm mit zusätzlichen 5 cm Aufbeton ausgegangen.

Im Dachgeschoss wurde noch zusätzlich ein Zementestrich von, zu dieser Zeit üblichen 35 mm eingebracht (Giebeler et al., 2008, S. 173–189). Die Decken spannen voraussichtlich einachsig von Außenwand zu tragender, längs verlaufender Innenwand. Im Gegensatz zu den knapp bemessenen, tragenden Wänden wurde auch in der Nachkriegszeit die obersten Geschossdecke mit derselben Nutzlast von $2,0 \text{ kN/m}^2$, wie die Decken der Wohngeschosse ausgelegt. Heute wird nach DIN EN 1991-1-1 die Nutzlast für Wohnraum mit $1,5 \text{ kN/m}^2$ angesetzt wird (Fath et al., 2019, S. 29). Zusätzliche Lasten durch einen neuen Bodenaufbau müssen in der Praxis zwar berücksichtigt werden, der Spielraum von $0,5 \text{ kN/m}^2$ kann jedoch eine aufwändige Ertüchtigung oder eine neue lastverteilende Ebene verhindern. In der Fallstudie wird davon ausgegangen, dass die Decke nicht nachgerüstet werden muss.

Die TABULA-Studie definiert typische U-Werte für Mehrfamilienhäuser zwischen 1949 und 1957 (Loga et al., 2015). So wird auch beim vorliegenden Gebäude in Kempten von einem U-Wert von $1,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für die Außenwände ausgegangen. Der U-Wert der Bestandsaußenwände ist wichtig, da bei einer Komplettsanierung eine Dämmung von ca. 24 cm angebracht werden müsste, um einen U-Wert von $0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für eine Passivhausqualität zu erreichen (Loga et al., 2015, S. 184). Diese zusätzliche Dämmung hat wiederum einen wesentlichen Einfluss auf den Anschluss des Bestandes an die Aufstockung. Verändert sich die Wandstärke im Bestand, so ändert sich auch die Position der Dämmebene, welche von der Dämmebene der Aufstockung fortgeführt werden soll.

Zusammenfassend wird für die Fallstudie angenommen, dass sowohl die Außenwände, die Fundamente als auch die Decken nicht ertüchtigt werden müssen. Insbesondere die Fundamente und Außenwände, sollten für weitere Untersuchungen von Experten hinsichtlich ihres tatsächlichen Zustandes untersucht und statisch geprüft werden.

3.3.2. Rahmenbedingungen für die Konstruktion

Nachdem der rechtliche Rahmen festgesteckt und der Bestand hinsichtlich seines Einflusses auf die auszuführende Aufstockung im Fallbeispiel aufgezeigt wurde, werden in diesem Unterkapitel die Annahmen zur Baukonstruktion diskutiert und festgelegt.

Energetisches Niveau und Kubatur

In den nächsten zwei Abschnitten wird deutlich, dass der Energiebedarf zum Betrieb eines Gebäudes wesentlich von seiner Geometrie, seines Wärmeschutzes sowie der verwendeten Gebäudetechnik und dem Energieträger abhängt. Dies gründet in der Annahme, dass zuerst die Kubatur, innerhalb welcher Wohnraum geschaffen werden soll, maßgebend für alle weiteren Entwurfsentscheidungen ist. Mit einem optimalen Verhältnis von Hüllfläche zu Gebäudevolumen kann unabhängig von jeder anderen Entscheidung schon im Vorhinein Betriebsenergie als auch graue Emissionen eingespart werden. Wird dazu noch ein optimales Verhältnis von Energieeinsparung zur aufgewendeten Materialmenge gewählt, wird nur eine minimale Menge an Energie für den Gebäudebetrieb benötigt. Eine geeignete Gebäudetechnik und ein dazu passender Energieträger in Abhängigkeit zum Energiebedarf führt somit zu einem minimal möglichen Treibhauspotenzial, vor allem im Gebäudebetrieb.

Je geringer das Verhältnis von wärmeübertragender Hüllfläche, A , zu beheiztem Gebäudevolumen, V , ist, desto geringer ist auch der Heizenergiebedarf des Gebäudes (Hegger et al., 2007, S. 86). Die Abbildung 23 aus dem Energieatlas macht zudem deutlich, dass das Verhältnis von Hüllfläche und Gebäudevolumen besonders dann einen großen Einfluss hat, wenn die Dämmeigenschaften der Außenhülle unter dem Energiestandard liegen. Unter der Berücksichtigung des A/V Verhältnisses wurde auch die Form der zu entwickelnden Aufstockung gefunden. Die Formel besagt, dass sich mit zunehmendem Gesamtvolumen auch das A/V -Verhältnis und damit der Heizenergiebedarf verringert. Um allerdings die Forschungsfrage zu beantworten, wie viel Potenzial die Aufstockung hat, genügend Wohnraum innerhalb der Ressourcen zu schaffen, soll der Bezug zur Deutschlandstudie beibehalten werden. Dadurch, dass die Studie sowohl die Qualität der Bausubstanz aus dem Bestand als auch die durchschnittlich, rechtliche Zulassungsfähigkeit berücksichtigt, kann sichergestellt werden, dass die entworfene Aufstockung, unter Berücksichtigung der Deutschlandstudie, durchführbar ist. Die Studie nimmt an, dass im Mittel 1,3 Geschosse aufgestockt werden können, was Staffelgeschosse zur Folge hätte (Tichelmann et al., 2016, S. 26). Es ist aber davon auszugehen,

dass die optimale Form aus ökologisch-energetischer Sicht ein Quader ist, der die bestehenden Außenwände nach oben hin verlängert. Eine eigene Studie, mit Hilfe der Software Caala, bestätigt diese Annahme (vgl. Abb. 24).

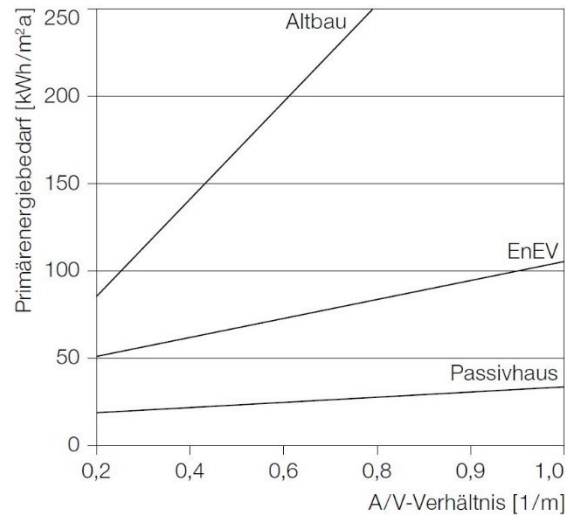


Abbildung 23: Einfluss Kompaktheit eines Gebäudes auf den Primärenergiebedarf (Hegger et al., 2007, S. 86, B 3.10)

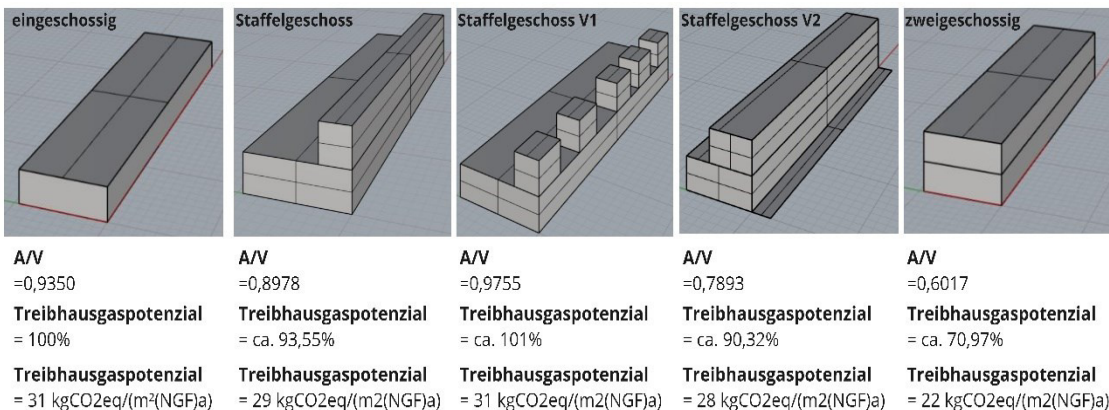


Abbildung 24: Vergleich der Treibhausgasemissionen verschiedener Kubaturen (eigene Darstellung)

Umso besser das A/V-Verhältnis, desto weniger Treibhausgasemissionen werden über den gesamten Lebenszyklus der Aufstockung benötigt. Um allgemeine Aussagen zu den Emissionen von Aufstockungen zu machen, sowie mit Blick auf die Praxis, ist allerdings statt einer zweigeschossigen Aufstockung mit besserem A/V-Verhältnis, eine eingeschossige Aufstockung im Fallbeispiel untersucht. Um herauszufinden wie viel Einfluss diese Entscheidung auf die Treibhausgasemissionen der konkreten Aufstockung hat, wurde überprüft ob die Emissionen des Staffelgeschosses den Emissionen aus

einer Kombination ein- und zweigeschossiger Kubaturen entsprechen würden. Folgen auf 1.685 eingeschossige Aufstockungen, 722 zweigeschossige, so entsprechen die Emissionen im Mittel den Emissionen einer Aufstockung um 1,3 Geschosse. Daraus lässt sich ableiten, dass der Treibhausgasbedarf für Wohnraum durch Aufstockungen im Durchschnitt vermutlich etwas geringer ist als die im Fallbeispiel errechneten Emissionen.

Am optimalen Flächen-Volumen-Verhältnis anknüpfend, beeinflusst auch der angestrebte Energiestandard für die Aufstockung die Emissionen für den Betrieb und die Konstruktion. Die Mindestanforderungen aus der GEG, stellen aber nicht automatisch das Optimum zwischen Betriebsemissionen und Grauen Emissionen dar. Eine gut gedämmte Gebäudehülle und ein effizientes Heiz- und Kühlkonzept hat einen geringen Energieverbrauch im Betrieb zur Folge. Allerdings werden auch mehr Ressourcen für die Gebäudekonstruktion beansprucht, um einen besonders guten Energiestandard herzustellen. Für die Aufstockung der Fallstudie ist daher ein Energiestandard gewählt, bei welchem die Treibhausgasemissionen nach heutigem Stand der Technik und dem aktuellen Energiemix über den ganzen Lebenszyklus eines Gebäudes am geringsten ausfallen.

In den Studien von Kaufmann (2017) und König (2017) wird deutlich, dass ein höherer energetischer Standard eine geringere Gesamtenergiebilanz über den ganzen Lebenszyklus von, in der Regel einem Zeitraum von 50 Jahren, zur Folge hat. Die Abbildung 25 aus dem Mehrgeschossigen-Holzbauatlas zeigt außerdem, dass der Einfluss der Konstruktion auf den Primärenergiebedarf mit steigendem Energieniveau zunimmt.

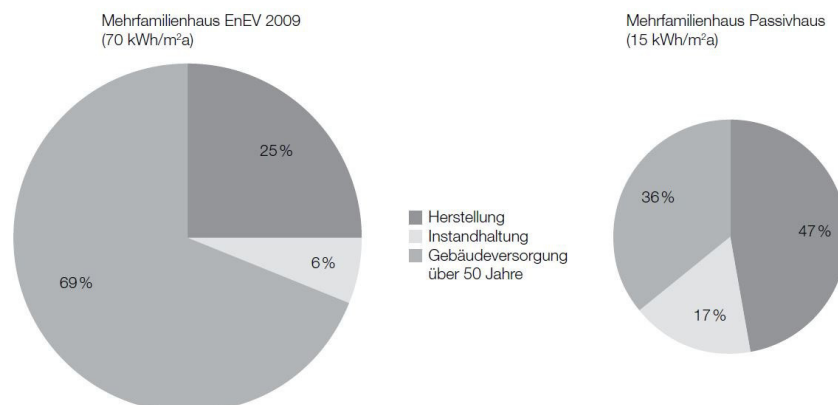


Abbildung 25: Zusammenhang des Primärenergiebedarfs der Konstruktion und des Betriebs von Gebäuden unterschiedlicher Energiestandards (Kaufmann, 2017, S. 27, A4.4)

Daran anknüpfend zeigt König (2017, S. 22), dass sich, unabhängig der Bauweise, zusätzlich zur Verbesserung der Gesamtenergiebilanz, auch der Wirkungsindikator „Treibhausgaspotenzial“ (Global Warming Potential, GWP) ähnlich verhält, wie die Gesamtenergiebilanz bei einem besseren Energieniveau. Das bedeutet, dass ein besseres Energieniveau zu weniger Treibhausgasemissionen führt, obwohl mehr Ressourcen, als zur Herstellung eines niedrigeren Energiestandards benötigt werden. Diese Erkenntnis ziehen auch Sartori und Hestnes (2007), die das Niedrigenergiehaus oder das Passivhaus als Optimum beschreiben. Auch Resalati et al. (2019) belegen, dass bei einem relativ niedrigen U-Wert der Hüllbauteile von ca. $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, insgesamt das geringste Treibhausgaspotenzial mit sich zieht. Sie unterstreichen aber, dass dieser Wert abhängig ist von den Dämmmaterialien, dem Gebäudetyp, der Belegungsmuster, des Klimas, der Datenqualität und der Lebenszyklusdauer.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird für die untersuchte Aufstockung ein besonders guter Energiestandard angestrebt. Für die Ökobilanz, die auf die Quantifizierung von Treibhausgasemissionen einer emissionsoptimierten Aufstockung abzielt, spielen dabei besonders die U-Werte der Bauteile und der Energiebedarf eine Rolle. Demnach beeinflussen Ziel-U-Werte maßgeblich die Bauteilkonstruktion beim Entwurf dieser Arbeit, während der Energiebedarf Rückschlüsse auf das Treibhausgaspotenzial im Betrieb zulässt. Zur Orientierung für geeignete U-Werte und Zielvorgaben zur Betriebsenergie, wird der Passivhausstandard herangezogen, da die Richtlinien der GEG nicht den gewünscht hohen Energiestandard verfolgen.

Für ein kühl-gemäßigtes Klima, wie das in Kempten, formuliert das Passivhausinstitut (2021) die nachfolgenden Zielwerte. Für opake Bauteile der Gebäudehülle zur Außenluft soll ein, Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von maximal $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, für vertikale Fensterflächen inklusive Fensterrahmen maximal $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ eingehalten werden. Ohne separates Heizsystem und ohne Klimaanlage darf der Jahresheizbedarf (Heizwärmebedarf) maximal $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ betragen. Der Gesamt-Primärenergiebedarf, bezogen auf eine vom Passivhausinstitut definiert Flächeneinheit, soll mit allen Anwendungen im Haushalt zudem einen Wert von $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nicht übersteigen. Um den unkontrollierten Luftwechsel und damit Lüftungswärmeverluste durch Infiltration zu minimieren, wird eine hohe Luftdichtigkeit von unter $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ angestrebt. Der Wärmebrückenzuschlag kann aufgrund der dichten Gebäudehülle mit $0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen werden.

Im Hinblick auf das Forschungsziel und unter der Berücksichtigung, dass keine ausführliche Energiesimulation durchgeführt wird, sind nur einige der genannten Kriterien aus dem Passivhausstandard für diese Arbeit relevant. So werden die angestrebten Ziel-U-Werte des Passivhausinstituts für den Entwurf der Fallstudie eingehalten oder unterschritten. Die Anforderungen an den Wärmebrückenzuschlag und die Luftdichtigkeit werden in der Energiebedarfsrechnung über Caala, wie im nachfolgenden Abschnitt beschrieben, pauschal berücksichtigt. Außerdem wird das Ziel des maximalen Heizwärmebedarfs vom Passivhausstandard übernommen. Über den maximalen Energiebedarf für Raumwärme aus den Passivhaus-Richtlinien, der Energieberechnung aus Caala für alle weitere Haustechnik, den Nutzerstrombedarf, sowie der Energie für die Warmwasserbereitung wird ein Energiebedarf errechnet. Dieser wird im Weiteren benötigt für die Berechnung des Treibhausgaspotenzials im Betrieb. Im Unterschied zum Passivhaus beziehen sich die Energieberechnungen in der Fallstudie und damit die Verwendung des maximalen Heizwärmebedarf jedoch, statt auf eine Berechnung nach dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) auf die Energiebezugsfläche (A_N) nach DIN V 18599-1. Von dieser Vereinfachung der Bezugsfläche geht auch König (2017) in seiner Studie aus. Die Bezugsfläche (A_N) wird sowohl in der GEG wie auch in der hier verwendeten Software Caala, als Bezugsgröße verwendet und bezieht sich auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche eines Gebäudes. Sie ist damit die nutzbare Fläche des beheizten Gebäudevolumens (V_e). Durch die Vereinfachung der Bezugsfläche können die Zielenergiebedarfswerte direkt in die LCA-Software übertragen werden. Zudem ist ein Ergebnisvergleich von Varianten mit anderen Energieniveaus, welche im Anschluss an diese Arbeit denkbar wären, leichter.

Diesen Abschnitt zusammenfassend, ergeben sich folgende Erkenntnisse zur Kubatur und dem energetischen Niveau für den Entwurf der Fallstudie. Obwohl eine Aufstockung mit Staffelgeschoss zu weniger Treibhausgasemissionen führt, wird mit dem Bezug zur Praxis und zur besseren Skalierbarkeit eine eingeschossige Aufstockung für die Fallstudie geplant. Zusätzlich wird ein Passivhausniveau angestrebt. Dabei dient der Passivhausstandard als Orientierung, von welchem die Vorgaben zum U-Wert und zum maximalen Energiebedarf für Raumwärme übernommen werden. In Abhängigkeit der Gebäudetechnik wird der Gesamtenergiebedarf über Caala berechnet.

Gebäudetechnik

Die Gebäudetechnik wird im Entwurf zwar nicht weiter vertieft, ist aber grundsätzlich wichtig für diese Arbeit, um den Energiebedarf und die damit verbundenen Emissionen im Betrieb einschätzen zu können.

Die benötigte und im weiteren Verlauf bilanzierte Gebäudetechnik besteht aus einer Kombinationslüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, einem Pufferspeicher für die Warmwasserbereitstellung, sowie einer Aufzugsanlage. Das Passivhausinstitut empfiehlt ein Kompaktaggregat, welches eine Kleinstwärmepumpe mit der Lüftungsanlage und deren Abluft kombiniert. Innerhalb eines Geräts kann so die Lüftung, eine Beheizung an Tagen mit Extremtemperaturen, sowie die Warmwasserbereitung sichergestellt werden (Passivhaus Institut, 2022). Aufgrund von eingeschränkten Datensätzen aus der Ökobaudat und somit auch innerhalb der Caala-Software, müssen für den Energiebedarf eines Sonderproduktes, wie dem Kompaktaggregat, Annahmen getroffen werden. Innerhalb der Caala-Software, aber auch für die Ökobilanzierung wird demnach eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung und eine Kleinstwärmepumpe mit einer Leistung von 7 kW angenommen. Welche Datensätze bei der Ökobilanzierung der Fallstudie für Gebäudetechnik verwendet werden, wird in Kapitel 3.5.2 im Rahmen der Sachbilanz beschrieben.

Der Gesamtenergiebedarf für die Fallstudie setzt sich zusammen aus dem Betriebsbedarf der Gebäudetechnik, dem Betrieb der Aufzugsanlage, sowie einem Pauschalwert für den Nutzerstrom (vgl. Tabelle 2). Die Software Caala berechnet für die Hilfsenergie der Wärmepumpe und den Pufferspeicher einen Energiebedarfswert von 4 kWh/m²a, der Endenergiebedarf bei einer maximal zulässigen Energie für Raumwärme wird durch Caala auf 5 kWh/m²a geschätzt, während die Energie zur Warmwasserbereitung nach DIN 18599-10 mit 5 kWh/m²a angegeben ist. Aus der Software heraus sind demnach 14 kWh/m²a für Lüftung, Heizung und Warmwasserbereitung angenommen. Für den Energiebedarf des Aufzugs während seines Betriebs wird die Berechnung zum Strombedarf für Aufzüge aus dem QNG-Handbuch Nichtwohngebäude (QNG, 2022) entnommen. Mit der Nutzungskategorie 2, der Energieeffizienzklasse A und einer Fahrstuhl-Geschwindigkeit von 1,0 m/s geht das QNG von 661 kWh/a pro Aufzugsanlage aus. Zuletzt fließt der Energiebedarf für den Nutzerstrom in die Energieberechnung ein. Dazu werden die Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden des BBSR (2019, S. 152) herangezogen. Die Tabelle wurde um Energiewerte für

Wohngebäude erweitert und ist somit auch für die Fallstudie anwendbar. Wird von besonders sparsamen Nutzergeräten und bewussten Nutzern ausgegangen, kann die Energieaufwandsklasse „sehr gering“ verwendet werden. Der Nutzerstrom wird demnach mit 18,4 kWh/m²(NGF)a angenommen.

Tabelle 2: Berechneter Energiebedarf der Fallstudie

Annahmen Energieberechnung	Energiebedarf [kWh/m ² a]	ermittelt durch
Energie für Raumwärme (Bedarf über Maximalbedarf Passivhausinstitut)	5	Caala
Hilfsenergie für Wärmepumpe und Pufferspeicher	4	Caala
Energie zur Warmwasserbereitung (Warmwasser-Bedarf pauschal)	5	Caala
Nutzerstrom	18,4	TEK des BBSR
Energie zum Betrieb des Aufzugs	1,7	QNG-Handbuch
	34,1	

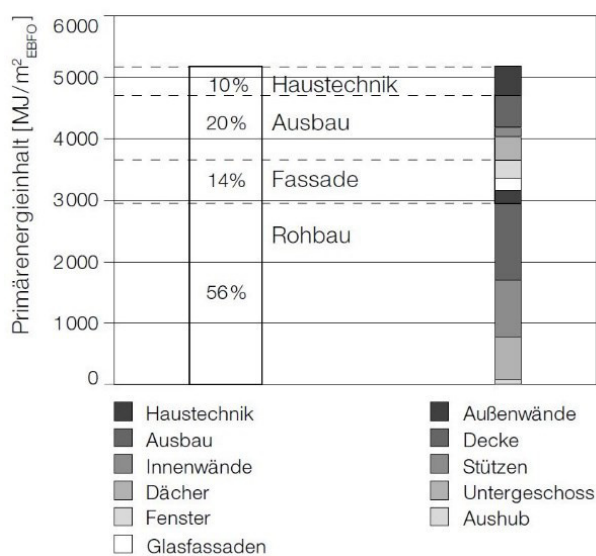
Für die Gebäudekühlung werden keine aktiven Maßnahmen der Gebäudetechnik vorgesehen. Allein die Orientierung und Fläche von Verglasungen, deren Sonnenschutz und die Verbesserung der thermischen Gebäudemasse, oder andere passive Maßnahmen sollen für ein behagliches Raumklima im Sommer sorgen. Die genaue Betrachtung und Optimierung der Behaglichkeit im Sommer, als auch im Winter ist im Rahmen der Arbeit aber vernachlässigt.

Zusammenfassend ergibt sich für die Gebäudetechnik und den Nutzerstrom ein Gesamtenergiebedarf von 13.580,2 kWh/a. Bezogen auf eine Netto-Raumfläche von 398,74 m², beträgt dieser 34,06 kWh/m²(NRF)a.

Baustoffauswahl

Mit steigender Energieeffizienz im Betrieb, verstärkt sich der Einfluss der Primärenergie und der des Treibhauspotenzials für die Herstellung und Instandhaltung von Gebäuden, wie die Abbildung 25 aus dem Abschnitt „Energetisches Niveau und Kubatur“ zeigt. Somit gewinnen bei einem effizienteren Betrieb, zusammen mit erneuerbaren Energieträgern, Einsparungen an grauen Emissionen für die Gebäudekonstruktion an Bedeutung. Die Wahl der Baustoffe rückt nicht nur für die Aufstockung im Fallbeispiel sondern auch für das zukunftsorientierte Bauen in den Fokus. Sowohl in Hegger (2007), als auch in Kaufmann (2017) erweist sich das Primärtragwerk als energieintensivste Bauteilgruppe. Die Abbildung 26 aus dem Energie Atlas veranschaulicht, dass neben dem Tragwerk

auch die Fassade und der Innenausbau einen entscheidenden Einfluss für die Energiebilanz eines Gebäudes haben. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich daher mit dem optimalen Baustoff für die Aufstockung generell, aber insbesondere mit einem geeigneten Baustoff für das energieintensive Tragwerk. So können neben den Betriebsemissionen aus den vorhergegangenen Unterkapiteln auch in der Konstruktion effektiv Treibhausgasemissionen eingespart werden.



**Abbildung 26: Primärenergieinhalt verschiedener Bau-
gruppen (Hegger et al., 2007, S. 162, B 5.55)**

In verschiedenen Lebenszyklusbetrachtungen konnte belegt werden, dass der Holzbau im Vergleich zu anderen Materialien die geringsten Treibhausgasemissionen aufweist. Nisse und Ambrecht (2020) vergleichen dazu fünf viel zitierte Ökobilanzen, unter anderem die in dieser Arbeit oft herangezogene Studie von König (2017). Sie kommen zum Ergebnis, dass sich Holz aus ökologischer Sicht am besten eignet, vorausgesetzt es wird nachhaltig erzeugtes Holz verwendet. Ausschlaggebend für das Ergebnis, Holz aus ökologischen Gründen anderen Baustoffen vorzuziehen, ist aber vor Allem der Betrachtungs- und Nutzungszeitraum und die sortenreine Bauweise in Bezug auf die Dämmmaterialien. Unterschiedliche Bauweisen fallen allerdings bei einem längeren Betrachtungszeitraum in der Lebenszyklusbetrachtung weniger stark ins Gewicht. Bei einem sehr langen Betrachtungszeitraum wird der Anteil der Betriebsemissionen so hoch, dass die Konstruktion und damit die Wahl des Baustoffes nur noch minimal ins Gewicht fällt. Genauso relativiert sich auch der ökologische Vorteil von biogenen Materialien, wenn die gesamte Konstruktion nicht sortenrein ausgeführt ist und beispielsweise die Dämmung aus konventionellen Materialien besteht. Dadurch, dass sich die Materialien nicht

oder nur sehr schwer trennen lassen, sind sie nur auf Bauteilebene und nicht einzeln austauschbar. Zudem wird die Wieder- und Weiterverwendung der Materialien erschwert. (Nisse & Armbrecht, 2020)

Bei idealer Konstruktion können mit dem Holzbau jedoch große Mengen an Treibhausgasen eingespart werden. Wittmann (2020) erarbeitet anhand eines Beispiels, dass im Vergleich zur Standardbauweise aus Stahlbeton, durch einen Neubau aus Holz fast 60% Treibhausgasemissionen eingespart werden. Wie auch Nisse und Armbrecht (2020) unterstreicht auch sie, dass die grauen Emissionen zur Errichtung und Entsorgung umso entscheidender für die Gesamtbilanz sind, umso kürzerer die Lebensdauer des Gebäudes ist. Neben Wittmann haben auch Püschel & Teller (2013, S. 60) mit der Beschreibung des Wohngebäudes E3 in Berlin das Einsparpotenzial durch Holz aufgezeigt. Hier konnten im Vergleich zu einer Stahlbetonbauweise 40% Primärenergie im Rohbau und der Tragkonstruktion durch die Holzbauweise eingespart werden.

Nicht nur um Energie und Treibhausgasemissionen einzusparen und fossile, nicht-nachwachsende Materialien zu substituieren, erweist sich Holz als ein zukunftsfähiges Baumaterial. Nachfolgend sind die Vorteile und Herausforderungen von Holz als Baumaterial nach Herzog (2003, S. 47–49), Dangel (2017) und Mooser et al. (2014, S. 27–35) zusammengefasst.

Wälder binden während ihres natürlichen Wachstums große Mengen an CO₂, die im später verwendeten und damit konservierten Holzprodukt gebunden bleiben. Wird die Lebensdauer von Holz durch die Verwendung als Bauprodukt verlängert, so wird die natürliche Zersetzung und damit die Freigabe von CO₂ aus dem Holz verhindert. Das CO₂ aus der Atmosphäre kann so im Bauprodukt langfristig gebunden bleiben. Der nachwachsende Rohstoff, Holz, wirkt als Kohlenstoffsенke dadurch aktiv der Erderwärmung entgegen. Aber auch nach seiner Verwendung als Baustoff hat Holz ein großes Potenzial fossile, nicht nachwachsende Rohstoffe als Sekundärrohstoff stofflich zu substituieren. Je nach Verarbeitungsgrad und Verunreinigung kann das Altholz auf stofflicher, biologischer und energetischer Ebene wiederverwendet oder weiterverarbeitet werden. Neben der Substitution fossiler Rohstoffe, wird bei der Wieder- und Weiterverwendung von Holzprodukten Energie und CO₂ für die erneute Rohstoffgewinnung eingespart. Insbesondere für die vertikale Nachverdichtung erweist sich Holz außerdem durch sein geringes Eigengewicht und dem hohen Potenzial zur Vorfertigung als besonders günstig. Bestandsgebäude, wie auch der Nachkriegsbau im Fallbeispiel, weisen

häufig nur geringe konstruktive Reserven auf, sodass eine Aufstockung nur mit besonders leichter Konstruktion möglich ist. Das Verhältnis von Tragfähigkeit und Gewicht ist, im Vergleich zu anderen Materialien, bei der Verwendung von Holz besonders gut. Mooser et al. (2014, S. 27–35) errechnen im Holzbau ein Zusatzgewicht von 5% bei einer Aufstockung aus Holz, während die gleiche Baumaßnahme aus Beton 50% mehr Gewicht zur Folge hätte. Zusätzlich eignet sich Holz besonders gut zur Vorfertigung. Das hat den Vorteil, dass die Qualität der Bauteile höher ist, da in der Werkstatt besonders präzise und ohne Witterungseinfluss gearbeitet werden kann. Zudem können anfallende Restprodukte noch in der Werkstatt gesammelt oder weiterverwendet werden. Im Bauprozess sind die vorgefertigten Bauteile einfach und schnell aufzubauen, sodass das aufzustockende Gebäude auch während der Bauzeit oft weitergenutzt werden kann. Die unkomplizierte Montage zusammen mit der verkürzten Bauzeit minimiert Lärmbelastungen für die Nachbarschaft und macht das Bauen auf begrenzter Fläche mit weniger Baustelleneinrichtung möglich. Bei der Verwendung von Holz als Baustoff gibt es jedoch einige Aspekte zu beachten, die mit konventionellen Baumaterialien weniger intensiv geplant werden müssen. Beispielsweise ist eine sorgsame Planung zum konstruktiven Holzschutz entscheidend für eine lange Lebensdauer des Gebäudes, da Holz anfällig auf Feuchte reagiert. Zudem müssen im Holzbau besondere Vorschriften zum Brandschutz beachtet werden (vgl. Kapitel 3.2.2), da Holz leichter entzündlich als abiotische Baustoffe ist. Auch beim sommerlichen Wärmeschutz erfordert der Holzbau zusätzlich Planung, aufgrund der geringen Speichermasse von Holz.

Ein entscheidender Vorteil aber zugleich eine Herausforderung ist, dass Holz eine nachwachsende Ressource ist. Der Umweltbundesrat kommt in einer Studie zum Potenzial von Bauen mit Holz zum Ergebnis, dass zwar mehr Holzbau in Deutschland möglich ist, allerdings nur bis zu einer gewissen Grenze und in Abhängigkeit der Art der Waldnutzung. Während beim offiziellen WEHAM-Basissszenario das Steigerungspotenzial der Holzbauquote bei 25% liegt, so könnte beim Holzpräferenzszenario der Holzbau über einen Zeitraum von 2012 bis 2052 um 220% gesteigert werden. Das Holzpräferenzszenario setzt allerdings eine Vorratsabsenkung und eine Steigerung des Rohholzpotenzials voraus. Außerdem wird davon ausgegangen, dass Holz genauso viel, wie auch im Untersuchungsjahr importiert wird. Bei der verstärkten Holznutzung im Gebäudesektor erhöht sich allerdings die Konkurrenz zu anderen Wirtschaftszweigen. Wolf et al. (2020) sehen insbesondere die Energiewirtschaft und den Möbelbau davon betroffen. Möglichkeiten für eine verstärkte Holznutzung sehen sie vor allem in der ressourcenschonenden Verwendung von Holz, der verstärkten

Kaskadennutzung, einer besseren Getrenntsammlung von Altholz sowie einer vermehrten Substitution von Nadelholz durch Laubholz. (Wolf et al., 2020)

Als Baumaterial für die Fallstudie bietet sich, unter Abwägung der vorangegangenen Fakten, besonders Holz an. Insbesondere mit dem Tragwerk können bei der Verwendung von Holz effektiv Treibhausgasemissionen eingespart werden. Um eine großflächige Verwendung von Holz auch für die Zukunft zu ermöglichen, muss aber ressourcenschonend mit dem Baustoff umgegangen und effektive Strategien zur Nachnutzung entwickelt werden. Für den Entwurf der Fallstudie wird dennoch, wo rechtlich und konstruktiv möglich, sowie unter Berücksichtigung der heutigen Praxis, Holz in allen weiteren Schichten der Aufstockung verwendet. Aus den Plänen im Anhang D können Entscheidungen zu Materialien der einzelnen Bauteilschichten nachvollzogen werden.

Bauweise und Tragwerk

Der vorangegangene Abschnitt zeigt, dass die Tragkonstruktion einen besonders hohen Einfluss an den Gesamtemissionen für die Herstellung eines Gebäudes hat. Die Entscheidung Holz als primären Baustoff zu verwenden, lässt drei Arten der Tragwerkskonstruktion zu: den Holzskelettbau, den Massivholzbau in Brettsperrholz- oder Brettstapelholzbauweise und den Holztafelbau, als Weiterentwicklung des Holzständerbaus.

Die Studie von König (2017) vergleicht Bauweisen mit Primärkonstruktionen aus Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton sowie Holzbauweisen als Holz-Beton-Hybridbau, Massivholzbau und Holzständerbau miteinander. Er kommt zu dem Ergebnis, dass allein aus ökologischer Sichtweise der Holzbau, insbesondere der Holzständerbau, die größten Emissionseinsparungen ermöglicht. Dies liegt einerseits am Baustoff Holz, aber andererseits auch an der Möglichkeit zum effizienten Einsatz der Ressource Holz in der Konstruktion. Mit dem Leichtbau können nach Hegger et al. (2007, S. 168) ca. 20% der grauen Energie im Vergleich zum Massivbau eingespart werden. Auch Zeumer (2014, S. 49) unterstreicht, dass der Leichtbau grundsätzlich die Umweltwirkungen, durch einen geringeren Materialverbrauch reduziert. Kaufmann (2017, S. 67) macht jedoch deutlich, dass ein höherer Materialbedarf, wie im Massivholzbau, auch einen größeren CO₂- Speicher darstellen kann, als materialsparende Leichtbaukonstruktionen. Eine Abwägung ist im Einzelfall sinnvoll. Im Fallbeispiel der Thesis wird allerdings das Ziel verfolgt, einen möglichst geringen CO₂-Fußabdruck zu erhalten. Bei einem Betrachtungszeitraum von pauschal 50 Jahren kann nicht ausreichend auf die potenziell längere CO₂-Speicherung eingegangen werden.

Durchführung der Fallstudie

Für diese Arbeit wird für das Tragwerk auf Grundlage der Ergebnisse von Hegger et al. (2007) und König (2017) die Holztafelbauweise gewählt. Diese Bauweise ist besonders materialsparend und damit leicht, günstig in der Herstellung, optimal für Vorfertigungen und kombiniert das Tragwerk und die Wärmedämmung in einer Ebene. Rähm, Ständer und Schwelle sind wenig komplex verbunden, oft stumpf geschraubt. Die Beplankung bildet einen Kraftverbund mit dem Ständerwerk. Dabei gibt sie Sicherheit vor Ausknicken der Ständer bei Vertikallasten. Horizontallasten senkrecht zur Wand werden über die Beplankung an die Ständer weitergegeben. Die Horizontalkräfte in Wandrichtung sind über die Beplankung an die Auflagerpunkte abgeleitet. Dennoch ist die Scheibenwirkung im Vergleich zu anderen Holzbauweisen gering, weshalb voraussichtlich zusätzliche Aussteifungselemente benötigt werden (Kaufmann, 2017, S. 52–53). Die zusätzliche Aussteifung kann im Fallbeispiel über die, aus Brandschutzgründen, mechanisch verstärkten Treppenhauswände, in Kombination mit der schubsteifen, massiven Bestandsdecke erfolgen. Das neu hinzukommende Treppenhaus wird über den massiven Aufzug und die umfassende, massive Dachkonstruktion ausgesteift. Sollten die Treppenhauswände der Aufstockung nicht ausreichen horizontale Kräfte erfolgreich abzuleiten, ist eine Verstärkung der Außenwände an den Schmalseiten, sowie an einem anschließenden Teilstück der längsverlaufenden Außenwand vorgesehen. Dies kann beispielsweise über eine zusätzliche Beplankung aus OSB-Platten erfolgen.

Über die Literatur konnte nicht nur ein optimaler Baustoff, sondern auch das geeignetste Tragwerk für die Aufstockung aus der Fallstudie abgeleitet werden, um den Bedarf an Treibhausgasemissionen für die Konstruktion zu reduzieren. Zur Dimensionierung der Konstruktion werden im Fallbeispiel Standardquerschnitte herangezogen. Ein Nachweis zur Standsicherheit, würde über den Rahmen dieser Arbeit hinaus gehen. Obwohl angenommen wird, dass eine mögliche Korrektur der Tragwerksquerschnitte nur einen geringen Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse der Aufstockung haben, ist für weitere Studien ein genauer Nachweis der Tragfähigkeit und gegebenenfalls eine Änderung in der Ökobilanz sinnvoll.

Zusammenfassend werden die folgenden Annahmen und Vereinfachungen aus der Analyse in diesem Kapitel für den Entwurf der Fallstudie übernommen. Es wird davon ausgegangen, dass der Bestand nicht ertüchtigt werden muss und die Fundamente, Außenwände und die oberste Decke ausreichend tragfähig für eine Aufstockungsmaßnahme sind. Es wird eingeschossig aufgestockt und das Energieniveau orientiert sich am Passivhausniveau, insbesondere hinsichtlich der U-Werte und des maximalen

Energiebedarfs im Betrieb. Aus dem Passivhausniveau und dem maximalen Energiebedarf ergibt sich auch die benötigte Gebäudetechnik. Der resultierende Gesamtenergiebedarf ist mit der Software Caala (P. Hollberg, 2016) berechnet. Als Baustoff für das Tragwerk und wo sonst möglich, wird Holz verwendet. Diese Entscheidung resultiert hauptsächlich aus den geringen Emissionen, die mit dem Holzbau verbunden sind. Daraus ergibt sich auch die Konstruktion im Holztafelbau, statt der Verwendung massiver Holzelemente.

3.4. Entwurf der Aufstockung

Die Rahmenbedingungen aus den beiden vorangegangenen Kapiteln führen schließlich zum hier beschriebenen Entwurf und Konstruktion. Alle Pläne und Detailzeichnungen befinden sich im Anhang D. Die genauen Bauteilaufbauten sind im Bauteilkatalog im Anhang C aufgeführt.

Entwurf

Für das untersuchte Quartier wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Aufstockung entwickelt, mit dem Ziel einen Referenzwert für die mittleren Treibhausgasemissionen für neu geschaffenen Wohnraum zu erhalten. Alle Entwurfsentscheidungen richten sich danach, dass möglichst geringe Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus der Baumaßnahme entstehen. Soziale und gestalterische Kriterien sind dabei weitestgehend vernachlässigt. Der vorgestellte Entwurf, soll nicht als tatsächlicher Umsetzungsvorschlag verstanden werden. Er stellt vielmehr eine Möglichkeit dar, wie Wohnraum mit minimalem Treibhausgaspotenzial geschaffen werden kann und dabei allen rechtlichen Anforderungen in Deutschland gerecht wird.

Das Quartier ist im Süden steil abfallend und begrenzt durch eine Hochschule. Im Westen und Norden fassen zwei vielbefahrene Straßen das Gebiet. Hinter der Straße schließt sich nördlich ein Mischgebiet und westlich ein Wohngebiet an. Eine als Hauptverkehrsader funktionierende, Straße grenzt das Quartier im Osten ein. Es gliedert sich auch hier ein Mischgebiet an. Über diese Straße findet auch die Hapterschließung des Grundstücks statt. Eine zusätzliche Einfahrt auf das Grundstück ist im Norden möglich. Die Zeilenbauten aus dem Baujahr 1953, prägen mit dem zugehörigen, großzügigen Abstandsrün das Baugebiet und heben sich mit ihrem Bautyp stark von der Bebauung der Nachbarschaft ab. Das Abstandsrün und der ausgeprägte Baumbestand prägen den Außenraum des Grundstücks. Die östlichen drei Zeilen sind den Plänen zufolge identisch. Diese Zeilenbebauung dient als Grundlage für den Entwurfsvorschlag.

Für die Aufstockung ist ein eingeschossiger leichter Holzbau geplant. Er verlängert den Bestand in seiner Kubatur nach oben hin, ist aber optisch durch seine dunklere Holzschalung vom Bestand abgehoben. Das Dach ist als Flachdach geplant. Das hat den Vorteil, dass es vorerst begrünt, aber in Zukunft auch beispielsweise für Dachgärten und zur Energieproduktion genutzt werden kann. Die Flachdächer der hohen Gebäude

in der Nachbarschaft im Norden und Osten, sowie in optischer Verbindung, die Flachdächer der Fachhochschule, sind prägend für die direkte Nachbarschaft. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich diese Dachform gemäß §34 BauGB in die Nachbarschaft einfügt. Die Fenster von Bestand und Aufstockung fluchten für ein harmonisches Zusammenwirken beider, ungleicher Gebäudeteile. Die Fenster in den Aufenthaltsräumen der Aufstockung sind allerdings bodentief geplant, um mehr Tageslicht im Innenraum zu erhalten. Übermäßige Wärmeeinträge sind trotz größeren Fenstern nicht zu erwarten, wie im nächsten Abschnitt beschrieben. Vor den Fenstern ist ein Versprung der Fassade denkbar. Er ermöglicht einen minimalen Austritt, der das Wohngefühl verbessert und als Gestaltungselement die Fassade gliedert. Die künstlerischen, identitätsstiftenden Geländer aus dem Bestand sollen auch in der Aufstockung als Absturzsicherung aufgegriffen werden, um eine optische Verbindung zum Bestand herzustellen.



Abbildung 27: Ostansicht des Bestands mit geplanter Aufstockung (eigene Darstellung)

Eine wichtige, gestaltgebende und entwurfsbestimmende Anforderung ist die erforderliche barrierefreie Erschließung von einem Drittel der Wohnungen. Die Zeile wird demnach durch ein neues Treppenhaus, an welches ein Aufzug anschließt, erweitert. Obwohl ein Laubengang soziale und gestalterische Vorteile hätte, stellt die gewählte Ausführung des neuen Treppenhauses die Erschließung mit dem geringsten Ressourcenbedarf dar. Das Treppenhaus ist so gestaltet, dass es bewusst als angefügter, eingeschobener Körper wirkt. Er tritt zwar stark hervor, aber soll in vor allem in seiner Nord- und Südansicht möglichst durchlässig wirken. Eine massive Wand im Osten fasst das gesamte Treppenhaus und den Aufzug, und rahmt mit einem massiven Dach den

eingeschobenen Baukörper ein. Eine Stahlseilkonstruktion begrenzt die Nord- und Südflanken des Treppenhauses, aber lässt den Durchblick und somit einen Überblick über das Gelände zu. So wirkt das Treppenhaus, insbesondere in Längsrichtung, nicht als zusätzliches Gebäude, sondern als durchlässige Konstruktion vor dem Hauptgebäude. Der grüne Charakter des Außenraums könnte auch hier, wenn brandschutztechnisch möglich, mit einer lichten Begrünung entlang der Stahlseile verstärkt werden. Das bestehende, südliche Treppenhaus wird nach oben hin erweitert. Das Bestandsgebäude ist in den Darstellungen mitaufgenommen, da er in der Praxis mitsaniert werden würde. Der Bestand ist aber nicht Betrachtungsgegenstand der Thesis. Die Maßnahmen, die im Rahmen einer Sanierung möglich und notwendig sind, müssen daher in weiteren Untersuchungen unbedingt überprüft werden.

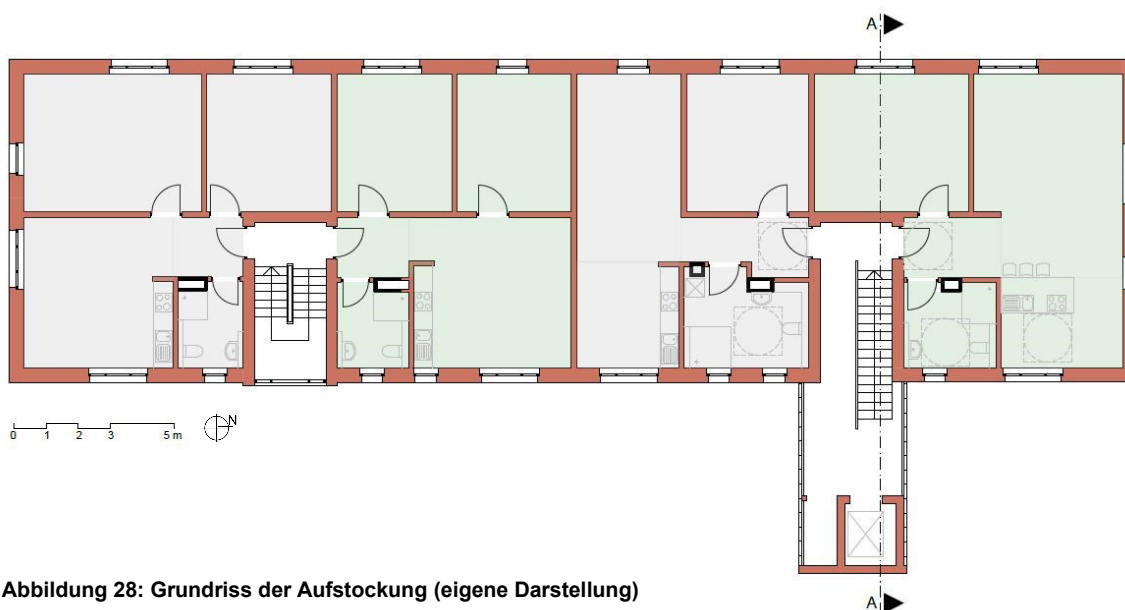


Abbildung 28: Grundriss der Aufstockung (eigene Darstellung)

Nachdem die Erschließung festgelegt ist, wurden die Grundrisse entwickelt. Das Regelgeschoss im Bestand erschließt über die beiden Treppenhäuser je zwei Wohnungen mit identischen Grundrissen. Während Badezimmer und Küche über alle Geschosse nach Osten hin orientiert sind, schließen sich die Wohn- und Individualzimmer im Westen an. Die dargestellten Grundrisse für den Entwurf der Aufstockung basieren auf der Annahme des Datenreports des Statistischen Bundesamtes, (Destatis, 2021c). Demnach bewohnt eine Person in Deutschland durchschnittlich 47,4m², woraus sich eine mittlere Wohnungsgröße von 92m² ergibt (Stand 2018). Dieser Wert wurde bei der iterativen Bearbeitung der Arbeit allerdings nach unten korrigiert. Es wird nun von 76,3 m² je Wohnung in Metropolregionen ausgegangen. Die Grundrisse sind so entworfen, dass jede

Wohnung dem festgelegten, durchschnittlichen Wohnflächenbedarf möglichst entspricht. Die neuen Wohnungen messen zwischen 64 m² und 73 m². Wie auch im Bestand gliedern sich je zwei Wohnungen an ein Treppenhaus an. Die Wohnungen am nördlichen Treppenhaus sind dabei barrierefrei erschlossenen. Im Unterschied zu den Bestandsgrundrissen sind die Bäder vergrößert und für ein großzügigeres Wohngefühl einzelne Wände herausgenommen. Zudem bringen größere Fenster mehr Tageslicht in die Wohnräume. Für weitere Studien kann der Entwurf entsprechend zusätzlichen Entwurfskriterien angepasst werden.

Konstruktive Ausführung

Eine detaillierte Ausarbeitung des Entwurfsvorschlages ist vor allem deshalb notwendig, um auf deren Grundlage eine realistische Sachbilanz für die Ökobilanz zu erhalten. Die wichtigsten Anforderungen, die an die einzelnen Bauteile gestellt werden, sind hier knapp aufgegriffen und im Anforderungskatalog im Anhang B zusammengetragen.

Durch die opake Ostfassade des Gebäudes schneidend, wurde ein Fassadenschnitt ausgearbeitet. Er zeigt die Fügung von Bestand und Aufstockung, sowie die Südansicht des neu geplanten Treppenhauses in dessen Ansicht. Hier wird neben dem Aufbau der Aufstockung und dem Anschluss an den Bestand deutlich, wie die Sanierung im Bestand ausgeführt werden könnte. Interessant ist hier der Sockelbereich, der Fassade und der Stoß von den angedachten Fertigelementen im Holztafelbau, die vor Ort nur noch übereinander montiert werden müssen. Die neue Holzfassade des Bestands ist über einen Stahlwinkel an die Bestandsdecken gehängt und endet schon 75 cm über dem Erdboden, da sich das Kellergeschoss, inklusive der Kellerfenster, noch um diese Höhe aus dem Erdboden herauschiebt. Die unterste Geschossdecke sollte im Zuge einer Sanierung, wie im Schnitt darstellt, gedämmt werden. Sowohl für die Aufstockung als auch für die Sanierung im Bestand ist eine Holzfassade geplant, da diese nach Zeumer (2014, S. 92) hinsichtlich ihrer Emissionen deutlich besser als andere Fassadensysteme abschneiden und der Austausch einzelner Elemente gut möglich ist.

In den Details ist die Fügung der Aufstockung mit dem Bestand und der Stoß von Dach und Außenwand dargestellt. Im Detail 1, dem Anschluss an den Bestand, lässt sich erkennen, dass die oberste Bestandsdecke bis auf die Rohdecke rückgebaut ist. Darauf baut sich ein Trockenhohlraumboden auf, der Raum für Installationen und die benötigte Lüftung bieten soll. Zwar sind genauere Berechnungen zum Schallschutz erforderlich, dennoch wird über Elastomerdämmplatten zwischen Stützkopf und Hohlbodenplatte,

sowie zwischen Stützen und Hohlboden der Trittschall minimiert. Die mineralische Doppelbodenplatte reduziert zudem die Trittschalllängsleitung. Erachten Fachplaner die Luftschalldämmung in den darunterliegenden Raum und die horizontale Luftschalldämmung als problematisch, können eine abgehängte Decke im Bestand und Absorberschotts im Hohlboden Abhilfe schaffen (Tichelmann & Pfau, 2007, S. 66–67). Die neue Außenwand steht auf der Bestandsdecke und wird mit einem Stahlwinkel in ihrer Lage gesichert. Die Geometrie ergibt sich aus dem fluchtenden Fassadenabschluss von Aufstockung und saniertem Bestand. Es ist eine offene, vertikale Schalung geplant, weshalb die Hinterlüftungsebene maximal 100 mm tief sein darf und die Brandschürze mindestens 200 mm über die Fassade ragen muss (Kaufmann, 2017, S. 94).

Das Detail 2 zeigt den Dachaufbau und den Anschluss an die Außenwand. Dargestellt ist eine Holzbalkendecke mit Zwischensparrendämmung und zusätzlicher Aufdämmung. Es ist extensiv begrünt und zu den Längsseiten hin entwässert. Die Attikahöhe ist nach DIN 18531-1, §6.7 festgelegt. In schneereichen Gebieten, wie in Kempten, ist aber zu prüfen, ob eine größere Anschlusshöhe erforderlich ist. Die Notentwässerung ist nicht dargestellt, prinzipiell würden Attikagullies oder Dachabläufe mit Anstaelement zur Anwendung kommen. Die genaue Höhenlage der Notentwässerung gemäß DIN EN 12056-3 muss aber von einem Fachtragwerksplaner berechnet werden, wodurch sich auch die Höhe der Attika ändern kann.

Die Fenster sind nicht in den Detailplänen dargestellt. Für den Entwurf, in dieser Thesis, haben sie zwei Hauptfunktionen. Zum einen sorgen sie für ausreichend Tageslicht im Innenraum und zum anderen haben beeinflussen sie die Wärmeerträge im Sommer und Winter. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, ist keine aktive Kühltechnik vorgesehen. Für den passiven, sommerlichen Wärmeschutz spielen vor Allem die Orientierung und Fläche von Verglasungen, deren Sonnenschutz und die thermische Gebäudemasse eine Rolle. Neben dem Verglasungsanteil je Himmelsrichtung, sorgt ein geplanter außenliegender Sonnenschutz, neben einem U-Wert von $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, und einem Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von 0,6 der Verglasung, für zusätzlichen Wärmeschutz an Tagen mit besonders starken Strahlungswärmeeinträgen. Unter der Berücksichtigung aller Funktionen einer Verglasung definiert der Energie-Atlas (2007, S. 97) optimale Anteile an Verglasungsfläche. Der Verglasungsanteil der Südfassaden soll weniger als 50% betragen. Im Osten und Westen soll die Verglasung unter 30% der Außenwandfläche einnehmen. Die Nordfassade spielt nur eine untergeordnete Rolle. Diesen

Richtwerten entspricht der Bespielentwurf. Süd- und Nordfassade sind im Entwurf zu ca. 17 % verglast, die Ostfassade zu ca. 26% und die Westfassade zu ca. 19%.

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Einschätzung von Emissionen beim Schaffen von Wohnraum. Auf der Detailebene sind deshalb Lösungen entwickelt, die den allgemeinen Regeln der Technik entsprechen, die aber für folgende Planungsphasen, über diese Studie hinaus, bauphysikalisch überprüft werden müssen. Für die Bauphysik bedarf es neben einem Wärmeschutznachweis auch der Prüfung des sommerlichen Wärmeschutzes in besondere noch Nachweise zum Feuchte- und zum Schallschutz.

3.5. Ökobilanzierung der Aufstockung

Über die Durchführung einer Ökobilanz in diesem Unterkapitel werden die Treibhausgasemissionen der in Kapitel 3.2, 3.3 und 3.4 entwickelten Aufstockungsmaßnahme quantifiziert. Zuerst wird das Ziel der Untersuchung aufgespannt, woraufhin der Lebenszyklus der Fallstudie genau modelliert wird, um diesem dann konkrete Umweltauswirkungen zuzuordnen. Abschließend kann somit eine Aussage getroffen werden, wie viele Emissionen eine treibhausgasreduzierte Aufstockung in der Konstruktion und im Betrieb benötigt. Die Auswertung und Zusammenhänge der erhaltenen Ergebnisse werden gesondert, in Kapitel 5.1.2, ausgeführt.

3.5.1. Ziel- und Untersuchungsrahmen

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Ökobilanz erstellt werden mit dem Ziel die Treibhausgasemissionen für eine eingeschossige Aufstockung auf ein Mehrfamilienhaus in CO₂-reduzierter Bauweise zu ermitteln. Mit den Ergebnissen kann die Forschungsfrage beantwortet werden, wie viele Treibhausgasemissionen bei der Konstruktion und dem Betrieb emissionsoptimierter Aufstockungen emittiert werden. Darüber hinaus kann beim Vergleich mit dem abgeleiteten Treibhausgasbudget für das Wohnen Stellung zur Hypothese genommen werden, dass es bei flächen- und emissionseffizienter Wohnraumerweiterung möglich ist, bis zur politisch angestrebten Klimaneutralität im Jahr 2045, ausreichend Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgas-Budgets herzustellen. Die durchgeführte Ökobilanz richtet sich an das Team des Lehrstuhls ENPB, das diese Arbeit betreut. Gleichzeitig werden auch politische Entscheider*innen, Planer*innen im Gebäudesektor, Bauherr*innen und Kommiliton*innen angesprochen. Sie sollen informiert werden, um auf Grundlage der Ergebnisse Entscheidungen zu treffen, die dazu führen, dass die globale Erderwärmung nicht über 1,5°C steigt.

Das Produktsystem ist die in Kapitel 3.4 beschriebene und in Anhang D dargestellte Aufstockung. Die Aufstockung im Holztafelbau umfasst eine Fläche von ca. 399 m² NGF und dient ausschließlich dem Wohnen. Die Bauteilaufbauten können dem Bauteilkatalog im Anhang C entnommen werden.

Die geographische Systemgrenze ist Deutschland. Es werden die Daten aus der Datenbank ÖKOBAUDAT (Version 2021-II) verwendet, welche auch in die verwendete

Software Caala (P. Hollberg, 2016) integriert ist. Über die verwendeten Datensätze der ÖKOBAUDAT erfolgt auch die Allokation der verwendeten Materialien und Energief-lüsse. Die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4+6, C3+4 sind, wie auch im Zertifizierungs-system der DGNB, als zeitliche Systemgrenze definiert (vgl. Abb. 29). Abweichend zur DGNB wird das Modul D nicht mit ausgegeben, da dessen Integration den Vergleich zum aufgestellten Treibhausgasbudget beeinflussen würde. Der Nutzungs- und Be-trachtungszeitraum ist auf 50 Jahre festgelegt.

Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase							Entsorgungsphase			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Rohstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport	Errichtung	Nutzung	Instandhaltung	Instandsetzung	Austausch	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau/Abriss	Transport	Abfallbeseitigung	Beseitigung

Abbildung 29: Berücksichtigte Lebenszyklusmodule (eigene Darstellung)

Das Verfahren für die Ökobilanz ist, wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, an der Studie von Fath et al. (2019) orientiert. Demnach werden zuerst die Emissionen der rückzubauen-den Materialien bilanziert, bevor die Aufstockungsmaßnahme begonnen werden kann. Darauf folgend fließen die genannten Module der Herstellungs-, Nutzungs- und Rück-bauphase für die Aufstockung in die Berechnung ein (vgl. Abb. 29). Für das Modul B wird die Tabelle des BBSR zu den „Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyk-lusanalyse“ verwendet (BBSR, 2017b). Baustoffe, deren Anteil an der Masse und den jeweiligen Umweltwirkungen des gesamten Bauteils weniger als 1% betragen, werden vernachlässigt. Die Summe der vernachlässigten Baustoffe darf 5% der Masse nicht übersteigen. Wichtig ist an dieser Stelle anzumerken, dass zwar in der Praxis vermutlich eine Bestandssanierung durchgeführt werden würde. Um allerdings das aufgestellte funktionale Äquivalent zu erreichen, wird eine Sanierung nicht bilanziert.

Die Funktion des Produktsystems ist es Wohnraum bereitzustellen, der hinsichtlich sei-ner Grauen Emissionen und Betriebsemissionen optimiert ist. Dafür muss das Pro-duktsystem allen rechtlichen Anforderungen entsprechen. Die funktionelle Einheit ist

als Quadratmeter Nettogrundfläche [m²-NGF] festgelegt. Im Gegensatz zur Bilanzierung je Wohnung, kann mit der Berechnung je m²(NGF) auf die Wohnflächenentwicklung eingegangen werden, wenn die Ergebnisse mit dem nationalen Treibhausgasbudget verglichen werden.

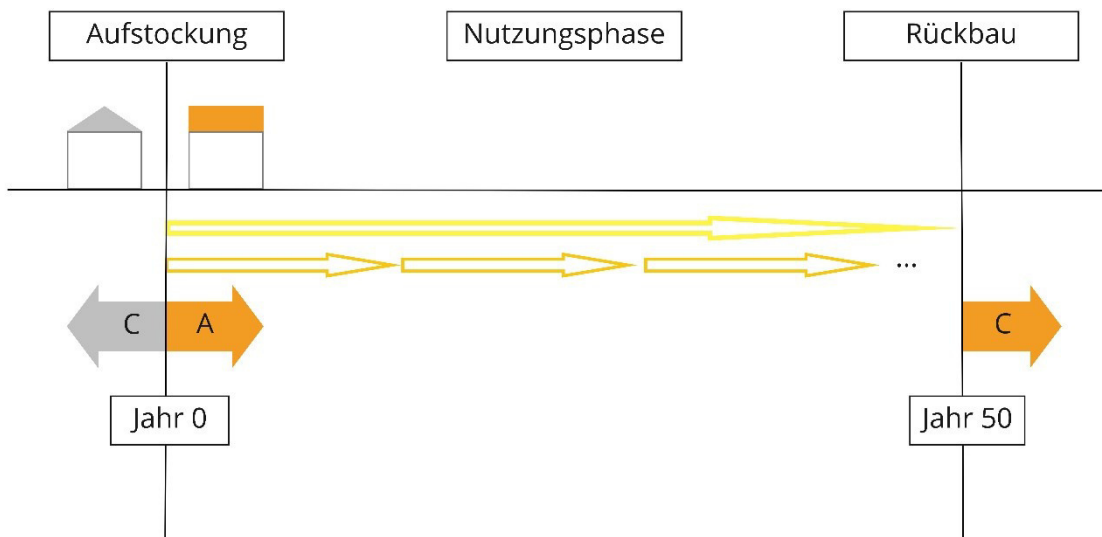


Abbildung 30: Verwendete Methode zur Ökobilanzierung der Fallstudie (eigene Darstellung in Anlehnung an (Fath et al., 2019, S. 114, Abb. 29))

Zusätzlich zu den Abschneidekriterien in Bezug auf die Masse von Baustoffen, ist der Aushub für das geplante, nördliche Treppenhaus mit Aufzug vernachlässigt. Auch die Innentüren sind in der Ökobilanz vernachlässigt. Zudem sind die Treppen übermessen und entsprechen der Materialität der Podeste. Wie in der Sachbilanz genauer beschrieben, wird die Gebäudetechnik pauschal erfasst. Unklar ist außerdem, ob die angenommenen Materialien des Bestands der tatsächlichen Ausführung entsprechen. Dies sollte durch einen Gutachter vor Ort überprüft werden. Hinzu kommt, dass die Materialeigenschaften der historischen Baumaterialien, nicht zwangsläufig auch den in der ÖKOBAU-DAT aufgeführten Materialien entsprechen.

3.5.2. Sachbilanz

Auf Grundlage des zuvor festgelegten Ziel- und Untersuchungsrahmens wird in der Sachbilanzphase der Lebenszyklus des Produktsystems genau modelliert. Das Ziel der Sachbilanz ist es, alle benötigten Daten der Prozessmodule, die innerhalb der Systemgrenzen liegen, zu sammeln und mit Bezug auf die funktionelle Einheit zu quantifizieren. Dazu gehören alle Ströme eines Systems, wie Energie- und Materialieninputs, genauso

wie Koppelprodukte, Abfälle und alle Outputs in Form von Emissionen in Luft, Wasser und Boden. Die zuvor definierte Datenbank, ÖKOBAUDAT dient dabei als Datenquelle für die Prozesse innerhalb des Produktsystems. (DIN EN ISO 14040:2009-11, S. 25; Zeumer, 2014, S. 32)

Das Produktsystem beinhaltet die in Tabelle 3 dargestellten Elemente, gegliedert nach Baugruppen gemäß DIN 276. Alle schwarz geschrieben Positionen definieren den Berechnungsumfang der Aufstockungsmaßnahme. Die unterstrichenen Kostengruppen stellen zusätzlich das Produktsystem für die Bilanz des Rückbaus dar. Vom Bestand wird das Dach, die halbhohen Wände im Dachgeschoss, der Fußbodenaufbau der obersten Geschossdecke und das nördliche Treppenhaus rückgebaut. Zum Neubau zählen die Räume der Aufstockung selbst, inklusive dem Bodenaufbau auf den Bestand. Außerdem wird das neue Treppenhaus mit Aufzug, die Erweiterung des südlichen Treppenhauses und eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für die Aufstockung bilanziert.

Tabelle 3: Produktsystem nach Kostengruppen (eigene Darstellung)

320 Gründung	400 Bauwerk - TECHNISCHE ANLAGEN
330 Außenwände	410 Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen
331 Tragende Außenwände	420 Wärmeversorgungsanlagen
334 Außentüren und -fenster	430 Lufttechnische Anlagen
335 Außenwandbekleidungen, außen	440 Starkstromanlagen
336 Außenwandbekleidungen, innen	450 Fernmelde- und informationstechnische Anlagen
340 Innenwände	460 Förderanlagen
341 Tragende Innenwände	470 Nutzungsspezifische Anlagen
342 Nichttragende Innenwände	480 Gebäudeautomation
345 Innenwandbekleidungen	490 Sonst. Maßnahmen für techn. Anlagen
350 Decken	000 Produktsystem der Aufstockungsmaßnahme
351 Deckenkonstruktionen	<u>000</u> Produktsystem Rückbau Bestand
<u>352</u> Deckenbeläge	000 nicht berücksichtigt
353 Deckenbekleidungen	
360 Dächer	
361 Dachkonstruktionen	
363 Dachbeläge	
<u>364</u> Dachbekleidungen	
370 Baukonstruktive Einbauten	
390 Sonst. Maßnahmen f. Baukonstrukt.	

Hervorzuhebende Annahmen für die Sachbilanz betreffen die Massenberechnung für das nördliche Treppenhaus hinsichtlich der Stahlseilkonstruktion und der Stahlkonstruktion der Decken. Für die Stahlseilkonstruktion an der Süd- und Nordfassade des Treppenhauses wurde angenommen, dass alle 20 cm ein vertikales Seil mit einem Durchmesser von 3mm von Dach bis zum Boden des Erdgeschosses spannt. Die Stahlträger der Decken für das Treppenhaus sind über deren Flächeninhalt der Stirnseiten, zu quadratischen Querschnitten mit gleicher Masse vereinfacht, sodass ein Gefachanteil

berechnet werden konnte. Der Stahlbeton setzt sich aus den Datensätzen „Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25“ und „Bewehrungsstahl“ zusammen. In der LCA-Software wurde von einem Gefachanteil von 0,02 ausgegangen, was ca. 2 Masse-Prozent entspricht. Für das Bestandsmauerwerk werden Datensätze zu verschiedenen Mauersteinen in Kombination mit einem Mörtel verwendet. Es wird das gleiche Verhältnis von Mauersteinen und Mörtel wie das von Beton und Bewehrungsstahl zueinander angenommen. Die Flächen werden über ein Gebäudemodell mit Caala (P. Hollberg, 2016) erfasst.

Die Annahmen zur Bewertung der Betriebsemissionen sowie die Annahmen zur Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) sind in Kapitel 3.3.2 erläutert. Zur Vollständigkeit sind sie hier noch einmal aufgegriffen und in Tabelle 4 und 5 dargestellt. Die Betriebsemissionen setzen sich aus dem Energiebedarf zur Gebäudekonditionierung, der Energie für den Warmwasserbedarf sowie dem Nutzerstrom zusammen. Der gewählte Energieträger ist Strom und wird mit dem generischen Datensatz „Strom für Gebäudebetrieb“ berücksichtigt.

Tabelle 4: Berechneter Energiebedarf der Fallstudie

Annahmen Energieberechnung	Energiebedarf [kWh/m ² a]	ermittelt durch
Energie für Raumwärme (Bedarf über Maximalbedarf Passivhausinstitut)	5	Caala
Hilfsenergie für Wärmepumpe und Pufferspeicher	4	Caala
Energie zur Warmwasserbereitung (Warmwasser-Bedarf pauschal)	5	Caala
Nutzerstrom	18,4	TEK des BBSR
Energie zum Betrieb des Aufzugs	1,7	QNG-Handbuch
	34,1	

Tabelle 5: Verwendete Gebäudetechnik für die Ökobilanz

Annahmen technische Gebäudeausrüstung	Quelle
Kleinstwärmepumpe (Luft-Wasser) 7kW	Ökobaudat
Pufferspeicher (Edelstahl)	Ökobaudat
dezentrale Lüftungsgeräte mit WRG 60m ³ /h	Ökobaudat
pauschaler Sockelbetrag Anlagenteile	QNG
Aufzugsanlage (stockwerkabhängig)	Ökobaudat

Die geplante Gebäudetechnik umfasst eine Kleinstwärmepumpe mit zugehörigem Pufferspeicher, 13 dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und einen Fahrstuhl. Für die Wärmepumpe wird der Datensatz für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit 7kW verwendet. Die Größe des zur Wärmepumpe gehörenden Pufferspeichers wird über die Tabellen in Anhang E berechnet. Aus der Tabelle 49 geht hervor, dass eine Wärmepumpe mit 7,9 kW Leistung einen Speicher-Nenninhalt von 75l hat. Nach Tabelle 54 wird in Abhängigkeit der Nettogrundfläche von ca. 400m² ein Speichervolumen von 174l für die Warmwasserbereitung bei ständiger Aufladung angenommen. Werden das benötigte Speichervolumen für das Heizen und die Warmwasserbereitung addiert, so ergibt sich ein benötigtes Volumen von 249l. Dieses wird benötigt, um das Gewicht des Pufferspeichers von 59,9kg für die Anwendung des Datensatzes aus der ÖKOBAUDAT zu ermitteln. Mit dem Ziel hygienische Luftbedingungen zu erreichen, wurden auch für die Lüftung Annahmen getroffen. Eine pauschale Mindestluftwechselrate ist in der Literatur nicht angegeben. Orientiert man sich an der DIN 1946-6, dass ein Luftvolumenstrom von 30m³ pro Stunde und Person erforderlich ist, so beträgt die Mindestluftwechselrate 0,4 1/h (BauNetz, 2022a). Grimm (2021) spricht sich in seinem Expertenartikel für die Empfehlung von Fachleuten aus der Praxis aus und beschreibt einen Mindestluftwechsel von 0,5 1/h. Es wird der konservative Ansatz von 0,5 1/h gewählt, was in der Ökobilanz mit 13 dezentralen Lüftungsgeräten, mit je einer Leistung von 60 m³/h, berechnet wird. Auch wenn in der Praxis eine zentrale Lüftungsanlage oder größere dezentrale Geräte denkbar sind, wurde für die Ökobilanz der Datensatz für dezentrale Lüftungsgeräte verwendet. Die Entscheidung wurde getroffen, da neben diesem Datensatz in der ÖKOBAUDAT nur Datensätze für zu groß dimensionierte Lüftungsanlagen verfügbar sind. Die Aufzugsanlage wird mit dem Datensatz für stockwerksabhängige Fahrstuhlanlagen berechnet. Zu den Emissionen der genannten Gebäudetechnik wird, nach den Bilanzierungsregeln des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude (QNG) außerdem ein Sockelbetrag für Anlagenteile addiert (QNG, 2021, S. 13). Je nach energetischem Standard, werden die Emissionen für Anlagenteile pauschal erfasst. Der Sockelbetrag beträgt für einen hohen energetischen Standard, wie ihn die geplante Aufstockung aufweist, 1,3 kgCO₂eq/m²(NRF)a.

3.5.3. Wirkungsabschätzung der Ökobilanz

Die Wirkungsabschätzung basiert auf den Ergebnissen der Sachbilanz. Den Massen der Input- und Outputströme, werden nun konkrete Umwelt- und Ressourcenauswirkungen zugeordnet, um das Produktsystem auswerten zu können. Die Charakterisierung ist bereits in den Datensätzen der ÖKOBAUDAT hinterlegt, sodass die Sachbilanzergebnisse nur den gewählten Wirkungsindikatoren zugeteilt werden. So genannte Charakterisierungsfaktoren dienen dazu eine gemeinsame Einheit zu generieren und geben, im Beispiel des Treibhauspotenzials, die Wirkung des einzelnen Gases am Treibhauspotenzial an. Die Charakterisierung umfasst die Definition der Wirkungsindikatoren zu den Wirkungskategorien und im Ergebnis die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte. (Zeumer, 2014, S. 34)

Für den angestrebten Budgetvergleich dieser Arbeit stehen die Treibhausgasemissionen im Vordergrund. Es werden für die Grauen Emissionen und die Betriebsemissionen daher nur das globale Erwärmungspotenzial (Global Warming Potential, GWP) betrachtet, welches in CO₂-Äquivalenten berechnet wird. Andere Wirkungskategorien werden trotz der Wechselwirkung zum Klimawandel vernachlässigt.

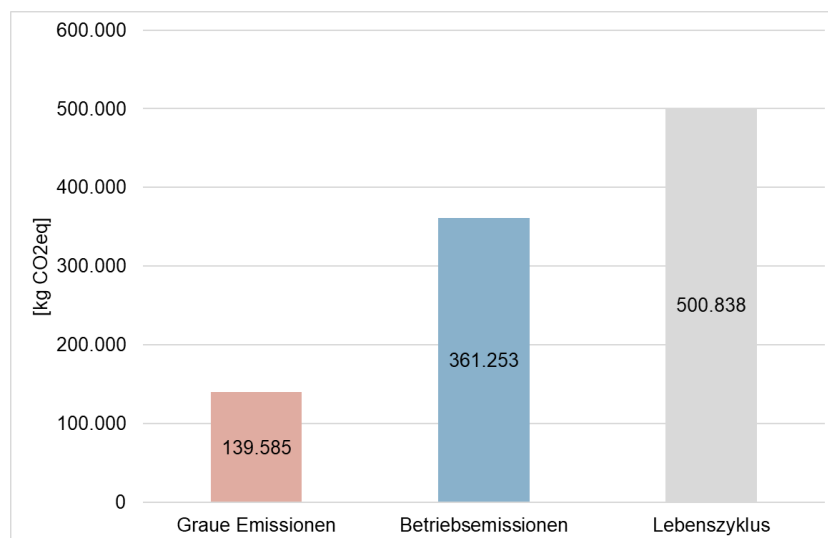


Abbildung 31: Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus der Fallstudie (eigene Darstellung)

Die Abbildung 31 zeigt das Ökobilanzergebnis für eine eingeschossige Aufstockung in treibhausgasreduzierter Bauweise über bei einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Bei Gesamtauswirkungen von 500.838 kg CO₂eq, werden davon mehr als zwei Drittel für den Betrieb des Gebäudes aufgewendet. Bei einem längeren Betrachtungszeitraum

würde der Anteil der Betriebsemissionen noch stärker ins Gewicht fallen. Wird dieses Gesamtergebnis auf die Nettogrundfläche bezogen und pro Jahr betrachtet, ergeben sich Treibhausgasemissionen von 25,12 kgCO₂eq/m²(NGF)a über den gesamten Lebenszyklus der Aufstockungsmaßnahme. Dieses Ergebnis eignet sich insbesondere für den Vergleich mit anderen Gebäuden mit demselben funktionalen Äquivalent. Aus Abbildung 32 wird deutlich, dass der Rückbau des Bestands im Vergleich zu den Gesamtemissionen nur marginal ins Gewicht fällt.

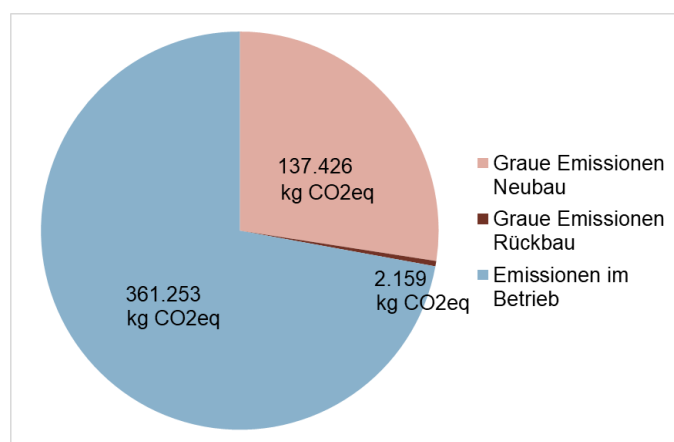


Abbildung 32: Anteil der Rückbauphase an den Gesamtemissionen (eigene Darstellung)

Der Anteil der Lebenszyklusphasen am Treibhauspotenzial der Aufstockung stellt Abbildung 33 dar. Das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) stellt den berücksichtigten Sockelwert der Anlagentechnik für die Kostengruppe 400 nicht getrennt nach Modulen bereit. Aus diesem Grund ist der Pauschalwert für die Anlagentechnik in dieser Darstellung vernachlässigt. Dennoch ist das Gewicht der Betriebsphase auffallend und würde sich bei dem Pauschalwert des QNG von 1,3 kgCO₂eq/m²a prozentual nur wenig verändern. Es ist außerdem zu erkennen, dass in der Entsorgungsphase knapp 70% mehr Treibhausgase emittiert werden als in der Herstellungsphase. Dies ist darin begründet, dass für die Konstruktion der Baumaßnahme überwiegend Holz und Holzwerkstoff eingesetzt werden. Während Holz durch seine Fähigkeit CO₂ zu binden negative Werte in der Herstellungsphase aufweist, wird das gespeicherte CO₂ in der Entsorgungsphase, je nach End-of-Life-Szenario, wieder freigesetzt und in den Kohlenstoffkreislauf zurückgeführt.

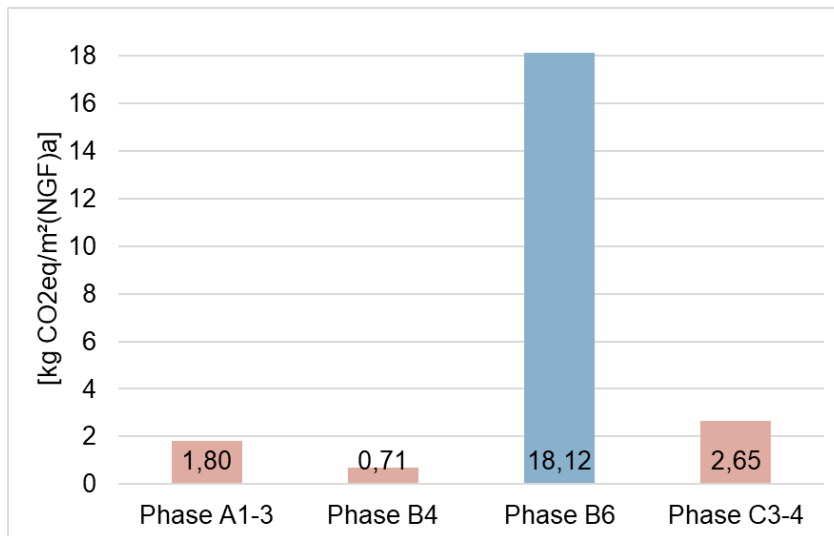


Abbildung 33: Treibhausgasemissionen gesamt, je Lebenszyklusphase, ohne Sockelwert nach QNG (eigene Darstellung)

An den Grauen Emissionen hat, wie die Abbildung 34 (nächste Seite) deutlich macht, das Dach den größten Anteil. Das liegt zum einen an seinem großen Flächenanteil, aber auch an seinem CO₂-intensiven Aufbau. Besonders viel CO₂ wird für die Bereitstellung des Vegetationssubstrats benötigt, gefolgt von der Kiesschicht als Drainage. Trotzdem wird dieser Aufbau als treibhausgasreduziert angesehen, da die Begrünung eine zusätzliche Dämmschicht darstellt und den Dachaufbau vor Witterung schützt. Besonders ausschlaggebend ist aber die Erkenntnis von Benz et al. (2018, S. 10–11), dass bis zu 1,2kg CO₂/m²a durch eine extensive Dachbegrünung gebunden werden können. Neben dem Dach weisen auch die Fenster und Wohnungstüren hohe Treibhausgasemissionen in Bezug zur Bauteilfläche auf (vgl. Abb. 35, nächste Seite). Die Stahlseilkonstruktion, der Hohlraumboden auf den Bestand, sowie die Wände sind Bauteile mit den emissionsärmsten Aufbauten. Beim Rückbau verursachen die abzubrechenden Außenwände die meisten Emissionen.

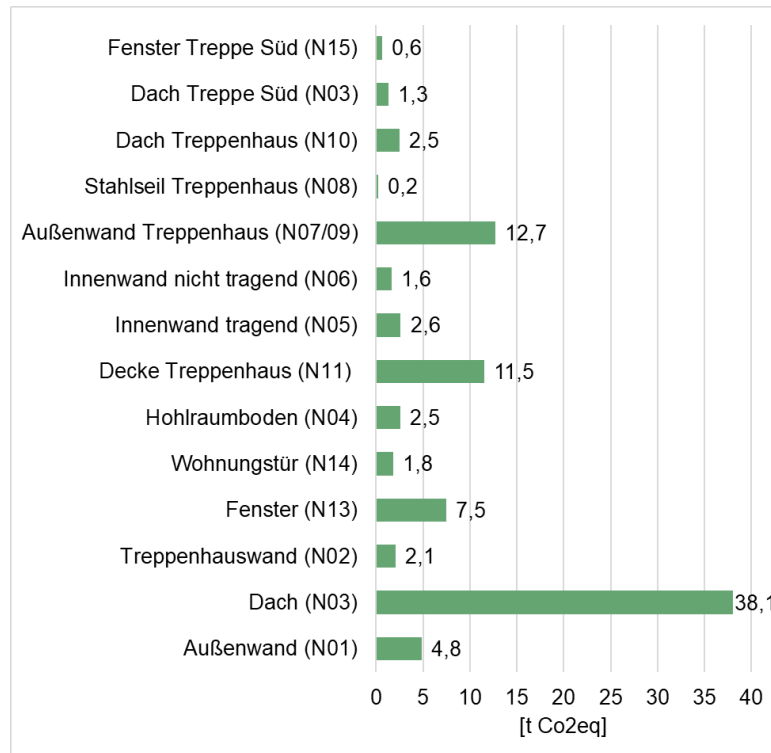


Abbildung 34: Treibhausgasemissionen der Bauteile total [t CO₂eq], Lebenszyklusphasen A1-3, B4, C3+4 (eigene Darstellung)

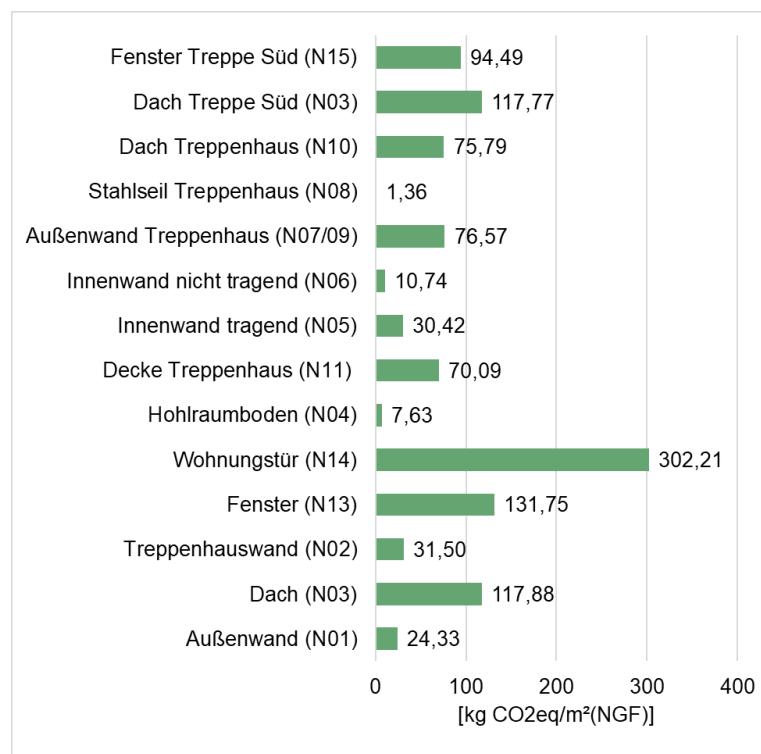


Abbildung 35: Treibhausgasemissionen, pro Bauteilfläche [kgCO₂eq/m²(NGF),] Lebenszyklusphasen A1-3, B4, C3+4 (eigene Darstellung)

4. Resultat

Nachdem die noch verfügbaren Treibhausgasemissionen für das Wohnen, sowie ein durchschnittlich benötigter Bedarf zum Betrieb und zur Konstruktion von Wohnraum aufgestellt werden konnte, werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen in diesem Kapitel nun gegenübergestellt. Durch diesen Vergleich kann die Kernfrage dieser Arbeit beantwortet werden, wie lange es noch möglich ist ausreichend Wohnraum innerhalb der verfügbaren, deutschen Treibhausgasemissionen herzustellen.

4.1. Gegenüberstellung von THG-Budget und THG-Bedarf

Wird das in Summe noch verfügbare Treibhausgasbudget für ein 1,5°C-Ziel ab 2021 von 236,66 MtCO₂eq für Graue Emissionen und 600,91 MtCO₂eq für den Betrieb von Wohnungen auf verschiedene Betrachtungszeiträume aufgeteilt, so ergibt sich für den Betrieb und die Konstruktion ein unterschiedliches Bild (vgl. Abb. 36 und Abb. 37). Im Folgenden werden die getroffenen Annahmen aus dem vorangegangenen Kapitel 3 noch einmal aufgegriffen und durch abschließende Zwischenschritte ergänzt.

Es wird demnach davon ausgegangen, dass bei einer durchschnittlichen Nettogrundfläche von 73,93 m²(NGF) pro Wohnung in Bedarfsregionen, jedes Jahr 400.000 Wohnungen benötigt werden. Pro Jahr werden somit 29,6 Mio m² neue Wohnfläche benötigt. Aus der durchgeführten Ökobilanz konnte ein Treibhausgasbedarf von 350,07 kgCO₂eq/m²(NGF) ermittelt werden. Eine Wohnung benötigt demnach durchschnittlich 25.879,65 kgCO₂eq. Das bedeutet, dass der Wohnungsbau in Deutschland jährlich ca. 19,35 MtCO₂eq/a Graue Emissionen benötigt. Bei einer theoretischen, konstanten Wohnungsnachfrage von 400.000 Wohnungen pro Jahr wäre das Budget nach 22,9 Jahren aufgebraucht.

Die Abbildung 36 stellt den berechneten Emissionsbedarf zur Schaffung für Wohnraum dem noch verfügbaren Gesamtbudget gegenüber. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 2.2.3 festgelegten Wohnflächenbedarf werden verschiedene Zeiträume bis zu einer theoretischen Klimaneutralität betrachtet. Der Betrachtungszeitraum von acht Jahren ergibt sich, wenn ein lineares Reduktionsszenario angestrebt ist. Der Zeitraum von 24 Jahren wird auf Grundlage des KSG gewählt, während der Ausblick ins Jahr 2100,

aufzeigt wie stark das verfügbare Budget bei unverändertem Bedarf auf längere Sicht überschritten wird.

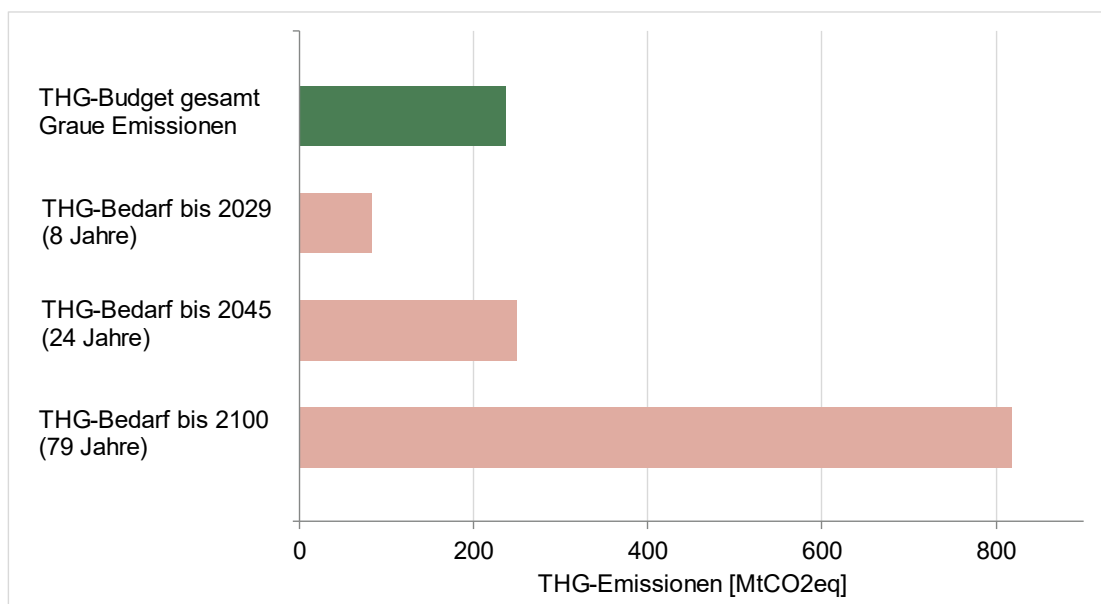


Abbildung 36: Benötigte Treibhausgasemissionen bei der Konstruktion von Wohnraum in Gegenüberstellung zum verfügbaren Budget (eigene Darstellung)

Zur Gegenüberstellung von Budget und Bedarf der Betriebsemissionen ist noch ein weiterer Rechenschritt notwendig. Während für die Aufstockung ein Treibhauspotenzial von 18,12 kgCO₂eq/m²(NGF)a berechnet wurde, so kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Bestand in ähnlich effizienter Weise betrieben wird. Die umweltökonomische Gesamtberechnung des Statistischen Bundesamtes (2021b) ermittelt für den Betrieb von Wohngebäuden 218 Mt CO₂-Emissionen im Jahr 2019. Umgerechnet auf die Einheit CO₂eq und aufgeteilt auf die vorhandene Nettogrundfläche im Jahr 2019, ergeben sich für die Treibhausgasemissionen des Bestands ein mittlerer Bedarfswert von 66 kgCO₂eq/m²(NGF)a. Während für den zu betreibenden Bestand demnach Betriebsemissionen von 66 kgCO₂eq/m²(NGF)a angenommen werden, so wird für den Betrieb von neuem Wohnraum der ermittelte Bedarf von 18,12 kgCO₂eq/m²(NGF)a verwendet. Das inkludiert zudem die Annahme, dass nicht saniert wird. Würde eine Sanierungsrate mitberücksichtigt werden, so würden sich die durchschnittlichen Betriebsemissionen für den Bestand pro Jahr verringern. In Abbildung 37 wird deutlich, dass das benötigte Budget innerhalb von 8 Jahren, mit den getroffenen Annahmen zum Bestands- und Neubaubetrieb, mehr als 3-mal so groß ist als das zur Verfügung stehende Budget.

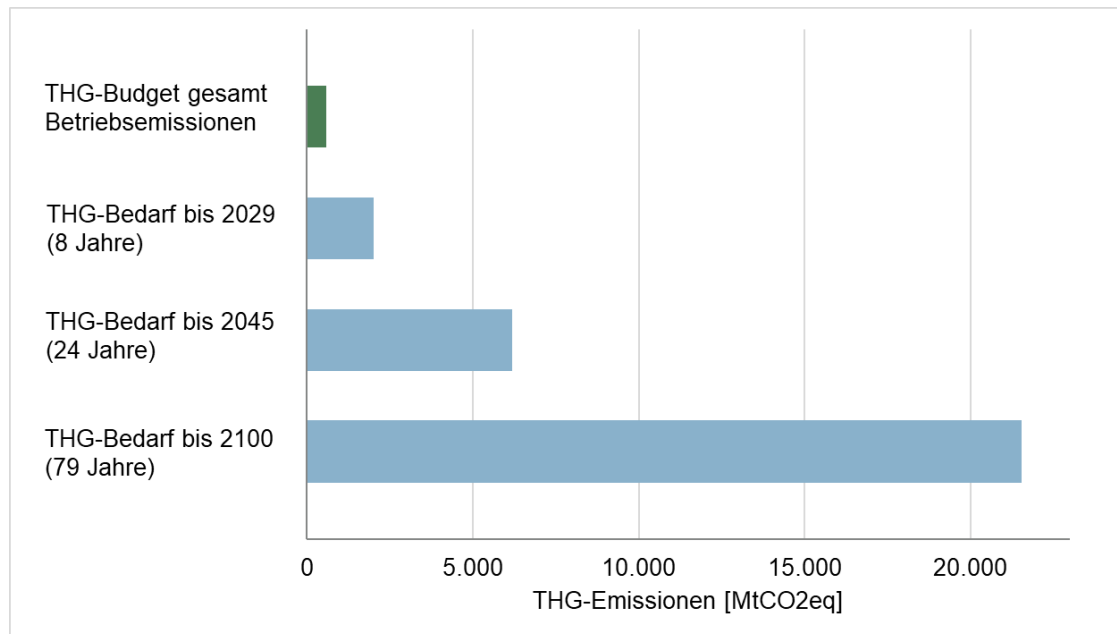


Abbildung 37: Benötigte Treibhausgasemissionen für den Betrieb von Wohnraum in Gegenüberstellung zum verfügbaren Budget (eigene Darstellung)

Die hier dem Budget gegenüber gestellten Emissionen beziehen sich auf eine Aufstockung, die durch ihre Flächen- und Ressourceneffizienz besonders emissionsreduziert hergestellt werden kann. Werden die Erkenntnisse aus Kapitel 2.2.4 berücksichtigt, besteht in Deutschland jedoch nur für maximal 116 Mio. m² Wohnfläche, bzw. 112 Mio. m² Nettogrundfläche, die Möglichkeit diese über Aufstockungen herzustellen. Das bedeutet, dass noch 3,8 Jahre lang Wohnraum geschaffen werden kann, der nur den berechneten, geringen Treibhausgasbedarf von 350,07 kgCO₂eq/m²(NGF) benötigt. Wird auch nach Erschöpfung des Aufstockungspotenzials, Wohnraum weiterhin in derselben Menge benötigt wird, verringert sich der zur Verfügung stehende Zeitraum von 22,9 Jahren für die Konstruktion von Wohnraum sehr wahrscheinlich.

Die Frage wie lange das deutsche Treibhausgasbudget für Wohnraum unter Berücksichtigung des 1,5°C-Ziels noch ausreicht, muss je Handlungsfeld unterschiedlich beantwortet werden. Auf Grundlage aller Annahmen dieser Studie kann noch für ca. 22,9 Jahre ausreichend Wohnraum geschaffen werden. Berücksichtigt man dabei, dass das Potenzial Wohnraum über Aufstockung zu schaffen nach ca. 3,8 Jahren erschöpft ist, so verringert sich dieser Zeitraum höchstwahrscheinlich. Der Wohnflächenbestand, zusammen mit dem neu hinzukommenden Wohnraum, kann dagegen nur noch für ca. 2,4 Jahre betrieben werden.

5. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus dem praktischen Teil der Arbeit, dem Kapitel 3, ausgewertet. Zum einen werden signifikante Parameter aufgezeigt, die Einfluss auf die Ergebnisse zum Treibhausgasbedarf und -budget haben. Es wird zudem bewertet, ob und inwieweit sich die Ergebnisse zur Beantwortung der sie betreffenden Forschungsfragen vor dem Gesamtkontext der Arbeit eignen. Im Anschluss werden hinzukommende Variablen bei der Gegenüberstellung von Bedarf und Budget diskutiert. Alle Unterkapitel werden, wo möglich, mit Referenzwerten aus der Literatur verglichen, um sie auf deren Validität zu prüfen.

5.1.1. Auswertung des abgeleiteten Treibhausgasbudgets

Um den Bedarf an Treibhausgasemissionen zur Schaffung von Wohnraum einordnen zu können, muss ein maximales Emissionsbudget für Wohngebäude definiert werden. Mit dem Top-down Ansatz aus Kapitel 3.1 konnte ein Budget von 1000,41 kgCO₂eq/m²(NGF)_a für die Grauen Emissionen für neuen Wohnraum und ein Budget von 19,21 kgCO₂eq/m²(NGF)_a für den Betrieb von Wohngebäuden abgeleitet werden. Das schließt das Ziel von einer maximalen Erderwärmung um 1,5°C und die Annahme zum Ende des Budgets im Jahr 2029 ein.

Die Abhängigkeit verschiedener Entscheidungen wird schon mit der Entscheidungsmatrix nach Habert et al. (2020) (vgl. Abb. 5, Kapitel 2.1.3), aber besonders bei der Durchführung der Methodik deutlich. Das Budget ist maßgeblich abhängig von der Zieldefinition und dessen Einheit, dem nationalen Aufteilungsprinzip, der Anteile der Sektoren am Gesamtbudget und am Handlungsfeld, der Definition des Handlungsfeldes, sowie schlussendlich der Darstellung der Ergebnisse. Je nach Definition dieser Variablen kann die Frage nach dem verfügbaren Treibhausgasbudget für den Bausektor unterschiedlich beantwortet werden.

Besonders relevant ist die Definition des Ziels und die Quelle der Daten. In der Gegenüberstellung verschiedener Zielwerte wird deutlich, welchen Einfluss die Zielsetzung auf die weitere Berechnung des verfügbaren Emissionsbudgets hat. Vergleicht man allein die wissenschaftlich erhobene Zieldefinition des IPCC, dann führt der Unterschied der Zieltemperatur von 0,25°C bei gleicher Wahrscheinlichkeit dieses zu erreichen zu einem fast doppelt so großen Budgetunterschied. Bei einem Unterschied des Temperaturziels

von 0,5°C erhöht sich das Budget von 420 GtCO₂ auf 1.170 GtCO₂ und ist damit fast dreimal höher (IPCC, 2019, S. 107). Auch bei der Gegenüberstellung mit politischen Zielen wird der Einfluss des Klimaziels deutlich (vgl. Abb. 15 in Kapitel 3.1).

Die Übersetzung von CO₂-Emissionen in CO₂-äquivalente Emissionen beeinflusst das Budget in dieser Arbeit um ca. 14%. Das Ausgangsbudget von 2.477,5 MtCO₂ erhöht sich auf ein Budget von 2.815,3 MtCO₂eq. Damit soll verhindert werden, dass unterschiedliche Einheiten bei der angestrebten Gegenüberstellung mit den Bedarfsemissionen verglichen werden. Der IPCC Bericht macht jedoch deutlich, dass die Reaktionen auf den Klimawandel und die Umwelt innerhalb der Gruppe der treibhauswirksamen Gase, je Gas sehr unterschiedlich sind (IPCC, 2019, S. 67). Die Definition eines Treibhausgas-Budgets ist somit auch davon abhängig, mit welcher Methode die treibhauswirksamen Gase in CO₂-Äquivalente übersetzt werden. Es kann aufgrund fehlender Vergleichsliteratur jedoch nicht abgeschätzt werden, inwieweit eine andere Umrechnungsmethode das Ergebnis beeinflussen würde. Anzumerken ist, dass das Pariser Klimaabkommen, neben der ungenauen Definition der Zieltemperatur, durch die offene Bezugseinheit einen weiteren Handlungsspielraum aufweist.

Großen Einfluss hat auch die Wahl des Aufteilungsprinzips auf die Länder. Die typischsten Möglichkeiten nach denen aufgeteilt werden kann, sind in Kapitel 3.1 aufgeführt. Nicht nur zwischen Aufteilungsprinzipien gibt es Unterschiede in den Ergebnissen, auch innerhalb eines Aufteilungsprinzips unterscheiden sich die Budgetdefinitionen je nach Art der Erhebung. Wird das globale Budget beispielsweise nach Einwohnerzahl, wie auch in dieser Arbeit, ermittelt, sind die Ergebnisse stark abhängig von der Aktualität und Genauigkeit der Quelle zur Erhebung von Einwohnerzahlen. Es kann jedoch nicht festgestellt werden, wie groß der Einfluss der Entscheidung zur Aufteilungsmethode und der Art der Durchführung ist.

Schwer einzuschätzende Unsicherheiten entstehen auch bei der Aufteilung des nationalen Treibhausgasbudgets auf die Wirtschaftssektoren und weiter auf die Sektoren der Bauwirtschaft. Die in dieser Arbeit verwendete Studie des BBSR (2020) ist, im Rahmen der durchgeführten Recherche, die einzige Studie für Deutschland, die die Emissionen für den Gebäudesektor nachvollziehbar und auf ein selbst definiertes Gesamtbudget übertragbar, darstellt. Zwar bietet die Studie des BBSR (2020) eine gute Ausgangslage, um nicht erneut eine Stoffstromanalyse durchführen zu müssen, jedoch gibt es einige Einschränkungen, die eine wissenschaftliche Ungenauigkeit und somit Grund zu

erneuten Studien darstellen. Zum einen unterliegt die Studie selbst Annahmen, aufgrund der Komplexität von Stoffstromzuweisungen. Zum anderen sind die Daten der Studie zum aktuellen Zeitpunkt schon 8 Jahre alt. Die Verteilung der Emissionen beim Bau von Gebäuden könnte sich stark verändert haben, beispielsweise durch neue rechtliche Anforderungen oder dem Trend zum Holzbau. In Zukunft kann auch ein geringerer Bedarf an Energie für den Betrieb in Kombination mit vermehrt regenerativen Energieträgern zu einer anderen Verteilung der Stoffströme je Wirtschaftssektor beitragen. Für das Treibhausgasbudget des Gebäudesektors bedeutet das, dass je nach Entwicklung der Bau- und Energiebranche verschiedene Wirtschaftssektoren mit unterschiedlichen Anteilen auf dieses Einfluss nehmen. Hinzu kommt, dass die Größe für ein Budget eines Wirtschaftssektors wiederum von der Zieldefinition für diesen Wirtschaftssektor abhängt. So könnte ein Sektor mit hohem Emissionsminderungspotenzial, zum Beispiel der Energiesektor, ein ambitionierteres Reduktionsziel zugewiesen bekommen, was ein geringeres Gesamtbudget für diesen Sektor, bedeuten würde. Beim Beispiel Energiesektor wäre bei angepasster Zieldefinition ein geringeres Budget für den Betrieb von Gebäuden vorhanden. Das geringere Budget könnte dann wiederum Treiber für entsprechende Entwicklungen in der Baubranche sein, um weniger Emissionen zu benötigen.

Darüber hinaus haben die berücksichtigten, geografischen und zeitlichen Systemgrenzen, sowie die Definition des Handlungsfeldes, Einfluss auf das Ergebnis eines Treibhausgasbudgets für den Gebäudesektor. Wie auch in der durchgeführten Ökobilanzierung werden nur Treibhausgasemissionen, die im Inland entstehen, berücksichtigt. Der BBSR (2021) weist allerdings auch zusätzlich die importierten Emissionen aus dem Ausland aus und macht somit den Einfluss dieser Abgrenzung deutlich. Die Emissionen für die Konstruktion von Gebäuden würden sich mit der Berücksichtigung der ausländischen Emissionen fast verdoppeln. Zudem musste die Studie des BBSR (2021) die Rückbauphase bewusst vernachlässigen, da die Autor*innen keine verlässlichen Daten finden konnten. Wie groß der Einfluss des Modul C für die Ökobilanz ist, wird mit der durchgeführten Ökobilanzierung am Fallbeispiel aufgezeigt. Zur Beantwortung der Forschungsfrage in dieser Arbeit, musste zudem die Herangehensweise des BBSR erweitert werden, sodass klar wird, welcher Emissionsanteil allein für Wohngebäude anfällt. Die hier verwendete Berechnung über die genehmigte Fläche von Wohngebäuden im Jahr 2020 im Vergleich zur Gesamtfläche aller genehmigten Gebäude, ist nur eine Annäherung. Sie kann bei einer differenzierten Stoffstromanalyse getrennt nach Wohn-

und Nichtwohngebäuden zu schwer abschätzbaren, abweichenden Ergebnissen führen.

Letztlich entscheidet das Reduktionsszenario darüber, bis wann von einem Ende des Budgets ausgegangen werden muss. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz einer linearen Reduktion führt dazu, dass schon bis 2029 alle verfügbaren Treibhausgasemissionen für ein 1,5°C-Ziel aufgebraucht wären. Dagegen rät der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) zu einer überproportional ambitionierten Emissionsreduktion bis 2030, sodass das Budget noch bis ins Jahr 2050 ausreichen würde (Umweltrat, 2021, S. 55). Solange die absolute Menge an verfügbaren Treibhausgasemissionen nicht überschritten wird, spielt die Aufteilung auf die Jahre theoretisch nur eine untergeordnete Rolle. Allerdings weist der Umweltrat darauf hin, dass zwar mit sinkendem Restbudget die Unsicherheiten zum Restbudget gleich groß bleiben, der relative Einfluss der Unsicherheiten jedoch zunimmt (Umweltrat, 2021, S. 46). Das unterstreicht den Ansatz des SRU schon jetzt, zu Anfang des Reduktionszeitraums, besonders ambitionierte Reduktionsziele zu verfolgen.

Die Wahl eines Reduktionsszenarios spiegelt sich schließlich in der Darstellungsweise eines vorhandenen Budgets dar. Umso spezifischer das ausgewiesene Budget dargestellt wird, desto mehr Annahmefehler können das Ergebnis verfälschen. In dieser Arbeit liegen diese Fehlerquellen vor allem in der Annahme des prognostizierten Wohnflächenbedarfs und bei der Berechnung der Bezugseinheit. Der Wohnflächenbedarf ist wie in Kapitel 2.2 beschrieben stark abhängig von der Bevölkerungsentwicklung und den Trends der Wohnungsnachfrage. Außerdem sind die Entwicklungen durch unvorhersehbare Schwankungen der Einflusskriterien dynamisch und nicht, wie hier vereinfacht angenommen, linear. Werden beispielsweise statt der benötigten 400.000 Wohnungen nur 200.000 Wohnungen pro Jahr benötigt, so erhöht sich das Budget je m² Nettogrundfläche um 93%. Würde statt einer durchschnittlichen Wohnfläche von 76,3 m² pro Wohnung die Wohnfläche auf 50m² sinken, so würde sich das Budget je m² Nettogrundfläche um 66% erhöhen. Dieses Gedankenspiel macht deutlich, wie eine falsche Annahme zum Wohnflächenbedarf das Treibhausgasbudget je m² erheblich verkleinert bzw. vergrößert. Auch die Umrechnung der Bezugseinheit Wohnfläche zu Nettogrundfläche, für einen besseren Vergleich mit der Ökobilanzierung, birgt Annahmefehler, da der Faktor der Umrechnung allein auf einer statistischen Erhebung zum Vergleich verschiedener Flächen miteinander basiert. Der Unterschied eines Budgets je Wohnfläche und eines je Nettogrundfläche beträgt allerdings nur rund 3%. Der dabei entstandene, mögliche

Fehler wird daher als gering eingeschätzt. Die sehr spezifische Darstellung eines Treibhausgasbudgets für Wohngebäude je m² bezieht demnach Fehler ein, die durch die Beschreibung eines Absolutbudgets für das jeweilige Handlungsfeld umgangen werden können. Besonders für das Ziel spezifische Bedarfsemissionen mit dem vorhandenen Budget zu vergleichen, eignet sich die Gegenüberstellung zu einem Absolutbudget (vgl. Kapitel 5.1.3).

Zusammenfassend wird klar, dass es je nach Annahme einzelner Differenzierungsschritte, aber auch schon bei der Definition eines globalen Budgets, große Unsicherheiten zu einem noch verfügbaren Treibhausgasbudget gibt. Unabhängig vom abgeleiteten und weiter verwendeten Budget, steigt der relative Einfluss einzelner Annahmen mit sinkendem Restbudget. Die Wahl des Reduktionsszenarios und die folgende Aufteilung je Wohnflächenbedarf, machen deutlich, dass das Potenzial an Fehlerquellen und somit die Verwendung eines unpräzisen Treibhausgasbudgets je Differenzierungsschritt steigt. Reduktionsszenarien, die in den ersten Jahren besonders ambitioniert sind, sollten daher angestrebt werden, um ein Klimaziel trotz großer Unsicherheiten in der Budgetaufstellung erreichen zu können.

Vergleiche des abgeleiteten Treibhausgasbudget zur Literatur, die einen ähnlichen Ansatz verfolgen, lassen sich nicht herstellen. Wie in Kapitel 2.1.3 aufgezeigt, unterscheiden sich die Budgets, aufgrund unterschiedlicher Zieldefinitionen und Aufteilungskriterien, sowie anderen Handlungsfeldern, teilweise um den Faktor 10 (Habert et al., 2020, S. 442). Die Zieldefinition des Treibhausgasbudgets aus dieser Arbeit ist ambitioniert, die Aufteilungskriterien statisch und das Handlungsfeld „Wohnen“ sehr spezifisch. Diese Annahmen sind so gewählt, dass ein Vergleich zum Fallbeispiel gelingt. Das definierte Budget eignet sich daher insbesondere zur Beantwortung der Forschungsfrage dieser Arbeit. Dennoch eignet sich die Methodik zur Ableitung eines Treibhausgasbudgets auch im Allgemeinen, um Budgets für weitere Handlungsfelder zu definieren. Die Diskussion aus diesem Unterkapitel beleuchtet dazu alle Parameter, die es bei den einzelnen Schritten zur Ableitung zu beachten gilt.

5.1.2. Auswertung des Entwurfs und der Ökobilanz

Für die Gegenüberstellung mit dem noch verfügbaren Treibhausgasbudget für Wohngebäude, konnte über den Entwurf einer emissionsoptimierten Aufstockung und der Ökobilanz dieses Entwurfes ein benötigter Treibhausgasbedarf von 7 kgCO₂eq/m²(NGF)a für die Gebäudekonstruktion und von 18,12 kgCO₂eq/m²(NGF)a

für den Gebäudebetrieb berechnet werden. Die Auswertung der Ökobilanzergebnisse in diesem Unterkapitel identifiziert signifikante Parameter und beurteilt welche Auswirkungen die getroffenen Annahmen im Entwurf und in der Methode der Lebenszyklusbeurteilung auf die Ökobilanz haben. Mit einem Vergleich zu Referenzwerten aus der Literatur wird zudem bewertet, ob sich die Ökobilanz für eine Gegenüberstellung mit dem nationalen Treibhausgasbudget aus Kapitel 3.1 eignet.

Graue Emissionen

Potenziale zur Verringerung der Grauen Emissionen und deren Ermittlung zeigen sich bei der Optimierung der Bauteilaufbauten, der Bestandsaufnahme und bei den Annahmen zur technischen Gebäudeausrüstung.

Wie in Abbildung 34 (vgl. Kapitel 3.5.3) ersichtlich, liegen Einsparpotenziale für einzelne Bauteile insbesondere bei den Bauteilen aus abiotischen Baustoffen. Hauptverursacher der Emissionen ist, wie in der Wirkungsabschätzung genannt und begründet, das Dach. Aufgrund der vielen Vorteile einer extensiven Begrünung, soll das Dach für diese Studie aber nicht weiter hinsichtlich seines Treibhauspotenzials optimiert werden. Trotz des flächenmäßig größten Anteils der Außenwand fällt diese mit insgesamt 4,8 tCO₂eq über den gesamten Lebenszyklus deutlich weniger ins Gewicht als Bauteile aus abiotischen Materialien mit einem geringeren Flächenanteil. Das liegt an den geringen Emissionen des Primärtragwerks im Holztafelbau. Auch der Einfluss der Tragwerksdimension in der Fallstudie kann damit besser eingeschätzt werden. So wird der Einfluss der Emissionen durch fehlerhafte Lastannahmen oder falsch dimensionierter Bauteile als gering eingeschätzt, da die Primärkonstruktion aus biotischen Baustoffen besteht. Für eine präzisere Emissionsermittlung sollte dennoch eine statische Berechnung durchgeführt werden. Die Fenster fallen durch ihren geringen Flächenanteil in Bezug auf die gesamte Aufstockung nur wenig ins Gewicht. Sie haben aber durch die Verwendung emissionsarmer Bauteilkomponenten trotzdem ein hohes Einsparpotenzial, wenn der genannte Maximalanteil an Verglasung aus Kapitel 3.4 voll ausgeschöpft werden würde. Zu den emissionsintensiven, aus abiotischen Materialien aufgebauten Bauteilen zählen die Decken des neu hinzukommenden, nördlichen Treppenhausens in Stahlkonstruktion, sowie dessen Außenwände aus Stahlbeton. Zwar ermöglicht die neue Holzbaurichtlinie, feuerbeständige Bauteile auch aus Holz herzustellen, und somit die Zulassung nach Art. 81a BayBO, allerdings sind diese nicht offiziell im Rahmen des Art. 24 BayBO gültig (Battran, 2021). Damit sie den Brandschutzanforderungen ohne zusätzliche Prüfung

genügen, bestehen die Bauteile dementsprechend nicht aus Holz. Die MHolzBauRL gilt auch für Aufzüge nicht. Aus diesem Grund ist die Aufzugsanlage aus der Fallstudie in Stahlbeton geplant, da eine genaue Prüfung der verwendeten Konstruktion, in Absprache mit einem Prüfsachverständigen, innerhalb dieser Arbeit nicht möglich ist. Es sind aber auch für diese Bauteile Baukonstruktionen mit einem Holztragwerk möglich, wenn sie der geforderten Brandschutzanforderung auf andere Weise, wie beispielsweise durch Kapselung, gerecht werden. Zusammenfassend liegt das Potenzial zur Verbesserung des Treibhauspotenzials der Bauteile vor allem in den Decken des nördlichen Treppenhauses und dessen Außenwände, sowie in der Konstruktion der Fenster. Um den Treibhausgasbedarf weiter zu senken, ist eine Studie zur Optimierung der einzelnen Bauteile und Bauteilschichten empfehlenswert.

Gleichzeitig stellen die Annahmen zum Bestandszustand und der -qualität eine schwer einschätzbare Variable für den Umgang mit dem Bestand und damit den Bedarf an Grauen Emissionen für die Aufstockung dar. Müssen die Außenwände, Fundamente und die oberste Geschossdecke nachgerüstet werden, so können teilweise emissionsintensive Nachrüstungen notwendig sein. Wie viel Einfluss eine Nachrüstung auf die Gesamtemissionen hat, kann jedoch nicht abschließend ermittelt werden. Auch die Deutschlandstudie beschäftigt sich mit der Herausforderung, dass der Einfluss dieser Variablen je Baujahr des Bestands sehr groß sein kann (Tichelmann et al., 2016). Die Studie konzentriert sich daher hauptsächlich auf das Potenzial aufstockbarer Mehrfamilienhäuser, die zwischen 1950 und 1989 errichtet wurden. So kann ausgeschlossen werden, dass das aufzustockende Gebäude in einem solchen Zustand ist, dass eine Baumaßnahme nur mit großem Aufwand möglich oder das Gebäude zu neu für eine umfassende Umbaumaßnahme ist. Für einen genaueren Emissionsbedarf am ausgewählten Standort, sollte der Bestand daher zusammen einem Gutachter auf seine Fähigkeit zur Aufstockung und möglichen Nachrüstung untersucht werden. Generell wäre eine Datenbank zum tatsächlich gemessenen Nachrüstungsaufwand je Gebäudealter bei Aufstockungen hilfreich, um zu den zu erwartenden Emissionsaufwand besser abschätzen zu können.

Die Ergebnisse für die KG 400 sind nur eingeschränkt belastbar, da die Emissionen für diese Kostengruppe nur pauschal ermittelt werden konnten. Die angenommene, notwendige Gebäudetechnik ist nicht durch Fachplaner bestätigt, zusätzlich wurde ein Pauschalwert der QNG angenommen, der nicht einer tatsächlichen Ausführung entspricht. Auch die DGNB weist in ihrem Bericht zur Ermittlung von Grauen Emissionen auf diese

Problematik hin (Braune et al., 2021). Sie empfiehlt, mit dem Verweis auf eine Studie des Umweltbundesamtes, einen prozentualen Aufschlag, je nach Berechnungsmethode, einzukalkulieren. Die KG 400 hat in der durchgeführten Ökobilanz für die Aufstockung einen Anteil von 21% an den gesamten Grauen Emissionen (vgl. Abb. 38). Auch Mahler (2019) bestätigt diese Emissionsverteilung. In seiner Studie macht die KG 400 22% aller Grauen Emissionen aus. Damit wird klar, dass die technische Gebäudeausrüstung einen wichtigen Einfluss auf die Emissionen eines Gebäudes hat. Besonders vor dem Hintergrund, dass der Technikanteil in Gebäuden steigt, sollte für vertiefende Studien, die KG 400 im Detail betrachtet werden (Braune et al., 2021, S. 13).

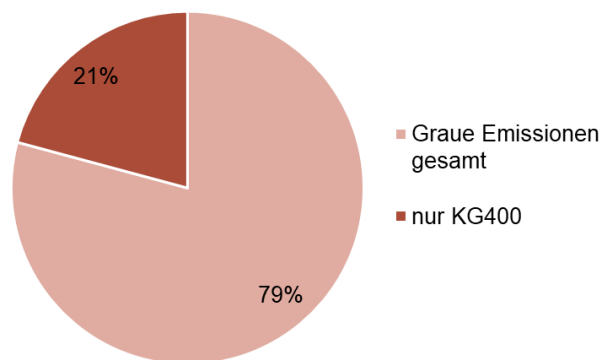


Abbildung 38: Anteil der Kostengruppe 400 an den Grauen Emissionen der Fallstudie (eigene Darstellung)

Der ermittelte Bedarf von $7 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2(\text{NGF})\text{a}$ für die gesamten Grauen Emissionen der Aufstockung deckt sich mit den Ergebnissen einer Studie des DGNB. Diese hat bei der Untersuchung von 50 Gebäuden, hauptsächlich Bürogebäude, einen Mittelwert von $8,7 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2\text{a}$ abgeleitet (Braune et al., 2021, S. 13). Der Vergleich mit diesem Ergebnis ist besonders gut geeignet, da der Großteil des Untersuchungsrahmens mit der eigenen Fallstudie übereinstimmt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Studie des DGNB von einer anderen Nutzung ausgeht und von ökologisch schlechter bewerteten Gebäuden, wie das in dieser Fallstudie. Im Ergebnis ist ein etwas geringerer Referenzwert als der Ermittelte von $8,7 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2\text{a}$, für den Vergleich mit der Fallstudie zu erwarten.

Einen guten Vergleich zu den Ergebnissen aus der durchgeführten Ökobilanz lässt sich auch mit einer Studie des Umweltbundesamtes ziehen (Mahler et al., 2019). Es werden 400 Wohngebäude in Deutschland über denselben Betrachtungszeitraum und dieselben Kostengruppen getrennt nach Bauweise und Energiestandard über ihren Lebenszyklus hinsichtlich Energieaufwand und Treibhauspotenzial untersucht. Da sich die

Ergebnisse der Studie aber, statt auf die in dieser Arbeit verwendete Nettogrundfläche, auf die Wohnfläche bezieht, müssen die Werte der Studie für einen Vergleich zuerst umgerechnet werden. Es wird der aus Kapitel 3.1 erwähnte Umrechnungsfaktor von 0,9689 verwendet. Ein Unterschied zu den Ergebnissen besteht außerdem bei der Berücksichtigung und damit den Emissionsgutschriften aus dem Modul D in der Vergleichsstudie. Die in der Studie abgeleiteten Referenzwerte sind daher etwas geringer, als wenn das Modul D unberücksichtigt bliebe. Mahler et al. (2019) leiten nach Umrechnung auf die Nettogrundfläche benötigte Treibhausgasemissionen von 12,6 kgCO₂eq/m²(NGF)_a für die Konstruktion ab. Dieser Studie zufolge würden für Gebäude im Holzbau hingegen nur ca. 7,8 - 9,7 kgCO₂eq/m²(NGF)_a benötigt werden (Mahler et al., 2019, S. 52–53, 2019, S. 48–50). Auch der berechnete Bedarf in dieser Arbeit von 7 kgCO₂eq/m²(NGF)_a deckt sich mit den Ergebnissen von Mahler et al. (2019).

Zusammenfassend lassen sich über die Ergebnisse zu den Grauen Emissionen aus der durchgeführten Ökobilanz sagen, dass diese mit Studien, die ähnliche Rahmenbedingungen aufweisen, übereinstimmen. Allerdings werden in den Vergleichsstudien nicht explizit Aufstockungen betrachtet. Der Vergleich zur Literatur bestätigt, dass die in dieser Arbeit berechneten Emissionen für Aufstockungen voraussichtlich geringer sind als das Treibhauspotenzial der vorliegenden Studien von Braune et al. (2021) und Mahler et al. (2019), da keine Gründung und Infrastruktur für Aufstockungen benötigt wird. Gleichzeitig lassen sich aber die Emissionen beim Umgang mit dem Bestand schwer einschätzen.

Betriebsemissionen

Das größte Potenzial zur Verringerung der Betriebsemissionen liegt in der Wahl des Energieträgers. Aber auch die Genauigkeit der Energiebedarfsberechnung und ein aktuelles Optimum an Gesamtemissionen von Konstruktion und Betrieb sind Hebel, die die Treibhausgasemissionen im Betrieb minimieren können.

Ein großes Einsparpotenzial von Treibhausgasemissionen ergibt sich durch die Wahl des Energieträgers. Der gewählte Datensatz zum Strom für den Gebäudebetrieb geht davon aus, dass 1kWh Strom für 0,532 kgCO₂eq verantwortlich ist. Würde das Gebäude mit Strom aus Windkraft betrieben werden, so verringert sich dieser Faktor auf 0,010 kgCO₂eq pro kWh. Statt eines Treibhauspotenzials von 18,12 kgCO₂eq/m²(NGF)_a würden so nur 0,36 kgCO₂eq/m²(NGF)_a emittiert werden. (vgl. Abb. 39). Damit wird deutlich, dass zum einen der Energieträger einen enormen Einfluss

an der Treibhauswirkung im Betrieb hat und zum anderen der Anteil der Grauen Emissionen aus der Konstruktion bei einer ökologisch verbesserten Energiebereitstellung außerordentlich an Gewicht gewinnt.

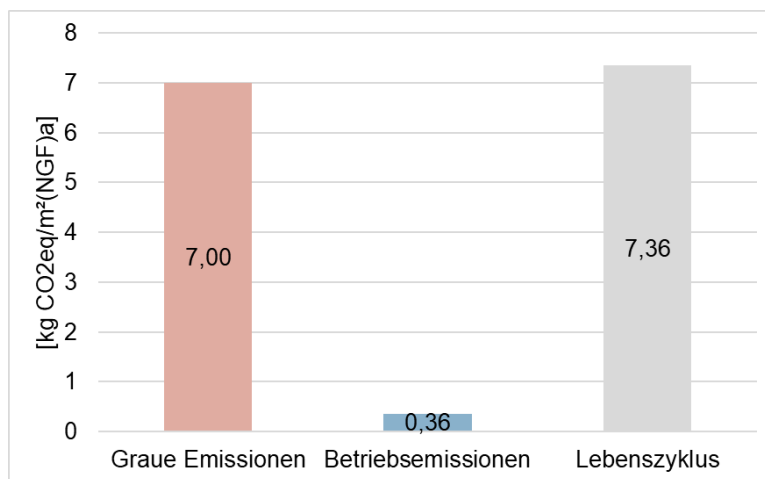


Abbildung 39: Treibhausgasemissionen bei Strom aus Windkraft (eigene Darstellung)

Genauso wie die Ermittlung der KG 400, ist auch der Energiebedarf nur pauschal festgelegt (vgl. Kapitel 3.3.2). Eine genauere und dynamische Simulation des Energiebedarfs, würde nicht nur im allgemeinen belastbarere Werte für den Einzelfall ergeben, sondern auch die Wechselwirkung von Konstruktion, Gebäudetechnik und Energiebedarf aufzeigen. Zusätzlich kann über eine dynamische Simulation auch auf das Nutzerverhalten eingegangen werden. Gerade bei Niedrigenergiehäusern, bei welchen nur wenig Energie zum Heizen benötigt wird, hängt der Energiebedarf maßgeblich vom Nutzer ab (Hegger et al., 2007, S. 23). In Verbindung zum oben genannten Aspekt bezüglich der Wahl des Energieträgers, könnte sich mit einer anderen Zusammensetzung des Energiemix auch ein anderes Optimum der Gebäudekomponenten einstellen. Es wäre beispielsweise denkbar, dass unter der Annahme einer vollständig klimaneutralen Energiebereitstellung weniger Emissionen entstehen, wenn der U-Wert schlechter, dafür aber der Konstruktionsaufwand geringer ist. Bei schlechteren Dämmeigenschaften, würde zwar mehr Energie benötigt werden, aber durch das Einsparen von mineralischem Dämmmaterial, könnten die Gesamtemissionen gesenkt werden. Daher wird empfohlen über eine Energiesimulation belastbare Energiebedarfswerte und ein Optimum an Konstruktion und Betriebsemissionen zu ermitteln. Diese sollten dann in regelmäßigen Abständen auf deren Aktualität überprüft werden. Auch die Verwendung statistisch erfasster Energieverbräuche für den geplanten Energiestandard aus dem

vorherigen Jahr eignen sich für vergleichende Studien, die die benötigten Betriebsemissionen dem verfügbaren Treibhausgasbudget gegenüberstellen.

Zusätzlich soll auch die Studie aus Kapitel 3.3.2 zum Einfluss der Kubatur erwähnt werden. Zwar wird in dieser Arbeit von einer eingeschossigen Aufstockung ausgegangen, dennoch ist nach Tichelmann et. al. (2016) zu erwarten, dass im Durchschnitt 1,3 Geschosse aufgestockt werden können, was ein besseres A/V-Verhältnis bedeutet. Der eigenen Untersuchung zufolge würde sich das tatsächliche Treibhausgaspotenzial insgesamt um ca. 7% verringern, wenn statt einem Geschoss durchschnittlich 1,3 Geschosse aufgestockt werden würden. Eine pauschale Aussage, für weiterführende Studien ist aber nicht möglich, da die Abhängigkeit der Emissionen zur Kubatur stark vom Energieträger und der Konstruktion abhängen.

Trotz der pauschalen Energiebedarfsermittlung decken sich die ermittelten Emissionen von $18 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2(\text{NGF})_a$ mit der Studie von Mahler et al. (2019, S. 52–53), der von einem durchschnittlichen Emissionsbedarf von $17,44 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2(\text{NGF})_a$ ausgeht. Allerdings verwendet er in seiner Rechnung Pellets als Energieträger, statt des hier verwendeten Stroms. Wie auch an dieser Ökobilanz demonstriert, unterstreichen Mahler et al. (2019), dass das Treibhauspotenzial besonders stark von der Wahl des Energieträgers abhängt. Je nach Energieträger ist ein Unterschied von 20-50 $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2(\text{WFL})_a$ zu beobachten (Mahler et al., 2019, S. 103–104).

Gesamtbetrachtung

Wird die Ökobilanz als Ganzes betrachtet, so liegt das Verhältnis von Grauen Emissionen zu Betriebsemissionen dieser Studie in den Referenzbereichen des DGNB Berichtes. Es werden in der durchgeführten Ökobilanz 28% aller Treibhausgasemissionen für das Bauwerk und 72% für den Betrieb benötigt. Die Studie der DGNB kommt zu dem Ergebnis, dass die Konstruktion mit 35% an den Gesamtemissionen beteiligt ist. Gleichzeitig verweist die DGNB auf die Studie von Mahler et al. (2019) die einen Anteil von 25%-40% an Grauen Emissionen ableitet.

Zusätzlich zur Optimierung einzelner Komponenten der Baumaßnahme, hat auch die Methodik der Ökobilanz, wie zu Anfang in Kapitel 2.4.3 aufgezeigt, einen Einfluss auf den berechneten Emissionsbedarf je Quadratmeter. Die DIN EN 15978 gibt in Kapitel 8, S.31 Hinweise wie damit umgegangen werden muss, wenn sich im Zuge einer Modernisierung das funktionale Äquivalent ändert. Über die Beschreibung von Szenarien

könnten innerhalb dieses Kapitels beispielsweise Szenarien für Sanierungen und Aufstockungen definiert werden. Somit wäre ein Vergleich unterschiedlicher Studien zu Umweltwirkungen von Sanierungs- und Aufstockungsmaßnahmen möglich. Auch die Fragestellung welche ökologischen Vorteile ein Abriss mit Neubau, eine Sanierung oder eine Aufstockung im Vergleich zueinander haben, wäre präziser zu beantworten.

Zusammenfassend führen der vernachlässigte Aushub für das Treppenhaus, das Vernachlässigen der Innentüren und die pauschale Annahme der KG400 voraussichtlich zu leicht erhöhten, realen Grauen Emissionen. Auch die potenzielle Nachrüstung des Bestands führt zu einem höheren Emissionsbedarf. Auf der anderen Seite können mit der Optimierung einiger Bauteile und einem verbesserten Strommix wieder Treibhausgasemissionen eingespart werden. Zusätzlich führen teilweise zweigeschossige Aufstockungen bei deutschlandweiter Betrachtung im Mittel zu einem geringeren Treibhausgaspotenzial. Alle Annahmen zur Baukonstruktion, die in Kapitel 3.3 diskutiert sind, wirken sich jeweils und zusätzlich in wechselseitiger Beziehung auf die Ergebnisse der Ökobilanz aus. Varianten der einzelnen Annahmen sind für weitere Studien sinnvoll, um ein Optimum für eine treibhausgas-reduzierte Aufstockung zu erhalten. Insbesondere das optimale Energieniveau, sollte je Gebäudetyp, Klimaregion, Belegungsmuster und Lebenszyklusdauer und Energiemix für jedes Gebäude individuell und aktuell abgewogen werden.

Die ermittelten Emissionen für die Konstruktion und den Betrieb der Aufstockung liegen bei dem Vergleich mit der Literatur unter den dort abgeleiteten Referenzwerten. Auch die in dieser Arbeit ermittelten Gesamtemissionen von 25,12 kgCO₂eq/m²(NGF)a für eine möglichst emissionsarme Aufstockung, stimmt unter Berücksichtigung der oben genannten Annahmen mit dem Ergebnis von 27,13 kgCO₂eq/m²(NGF)a aus der Studie von (Mahler et al., 2019, S. 48–50) überein. Die Ergebnisse werden daher als valide angenommen, auch wenn es einer groß angelegten Studie bedarf, um statistisch aussagekräftige Ergebnisse für Wohngebäude in ganz Deutschland zu erhalten.

5.1.3. Grenzen beim Vergleich von THG-Budget und THG-Bedarf

Zur Beantwortung wie lange Wohnraum noch innerhalb des verfügbaren, deutschen Treibhausgasbudget geschaffen kann, wurden das in dieser Arbeit abgeleitete Budget für den Wohnungsbau (vgl. Kapitel 3.1) und das über die Fallstudie ermittelte, mittlere Treibhausgaspotenzial (vgl. Kapitel 3.5) gegenübergestellt. Es konnte festgestellt werden, dass unter allen Annahmen in dieser Arbeit das Treibhausgasbudget noch 22,9

Jahre für die Konstruktion von Wohngebäuden und noch 2,4 Jahre für den Betrieb aller Wohnungen in Deutschland ausreicht. Allerdings verkürzt sich die verfügbare Zeit von 22,9 Jahren zur Errichtung von Wohnraum unter Berücksichtigung des Potenzials an Wohnraum voraussichtlich noch einmal. Dementsprechend müssten, unter den in dieser Arbeit definierten Annahmen, alle Wohngebäude ab Mitte 2023 klimaneutral betrieben werden, um das 1,5°C-Ziel zu erreichen. Für dieses Ziel dürfte außerdem auch die Konstruktion ab Winter 2043 keine Emissionen mehr benötigen.

Dieses Ergebnis ist stark abhängig von den Einflussfaktoren zur Aufstellung eines Budgets, den Anforderungen und der Ausführung des Gebäudes, wie auch von der Berechnung der Emissionen selbst. Die Variablen bezüglich des Budgets und des Bedarfs sind in den vorhergehenden Abschnitten (Kapitel 5.1.1 und 5.1.2) ausführlich erläutert und in Abb. 40 zur Übersicht zusammengefasst. Neben diesen Variablen der Vergleichswerte ergeben sich aber auch bei deren Gegenüberstellung, und damit bei der Beantwortung der Kernfrage, Einschränkungen, die im Folgenden aufgezeigt werden.

signifikante Variablen bei der Definition des THG-Budgets	signifikante Variablen bei der Definition des Emissionsbedarf der Fallstudie
- Wahl der Bezugsquelle (definiert die Ermittlung planetarer Emissionsgrenzwerte)	- Zustand des Bestands
- Wahl des Temperaturziels	- Energieniveau und Kubatur
- Einheit des Budgets und ggf. dessen Umrechnungsweise	- Baustoffauswahl + Bauteilaufbau
- Aufteilungsprinzip in nationale THG-Budgets	- Bauweise
- prozentuale Anteile von Wirtschaftssektoren am Gesamtbudget und deren dynamische Entwicklung	- Annahme zur Gebäudetechnik
- Anteil des Handlungsfeldes an den	- Annahme zum Gebäudebetrieb
- Untersuchungsrahmen des Handlungsfeldes (nutzungsspezifisch, geografisch, zeitlich)	- Annahmen zum Energieträger
- Reduktionsszenario und Bezugseinheit	- Wechselwirkung Konstruktion + Gebäudebetrieb
- Darstellungsweise, hier: Wohnflächenentwicklung	- Methode der Ökobilanzierung für den Sonderfall Aufstockung
	- Systemgrenzen und Datenqualität der Ökobilanzierung

Abbildung 40: Variablen des THG-Budgets und des THG-Bedarfs

Allgemein gilt, dass nur bei gleichen Rahmenbedingungen Ergebnissen zweier Untersuchungen uneingeschränkt miteinander verglichen werden können. Es war innerhalb dieser Arbeit jedoch nicht möglich durchweg, identische Rahmenbedingungen herzustellen. Insbesondere bei der Definition der Systemgrenzen zum betrachteten Produktsystem und bei der Auswahl der betrachteten Lebenszyklusmodule weichen die Methode zur Quantifizierung der verfügbaren Emissionen von der der Bedarfsemissionen für Wohnraum ab.

Demnach beschreibt das Budget die noch verfügbaren Emissionen für die Konstruktion und den Betrieb von Wohngebäuden. Zusätzlich werden auch der Erhalt und die Modernisierung bestehender Wohngebäude miteinkalkuliert. Die Ökobilanz der Fallstudie grenzt sich jedoch bewusst davon ab, eine mögliche Bestandssanierung einzuberechnen, um das funktionelle Äquivalent „Schaffung und Betrieb von Wohnfläche“ so eindeutig wie möglich zu halten. Die verwendete Studie des BBSR (2020) bedingt die Produktgrenzen des Budgets. Jedoch war es auch nach dem Kontaktversuch der Autoren dieser Studie nicht möglich die Stoffströme, die bei Erhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen anfallen, vom Gesamtergebnis zu trennen. Das abgeleitete Budget ist daher wahrscheinlich etwas höher als das tatsächlich zur Verfügung stehende Budget für Wohnfläche ohne die gleichzeitige Sanierung des Bestands.

Zusätzlich wird das Modul C in der Studie des BBSR (2020) nicht bilanziert, da nach Angabe aus dem Bericht keine belastbaren Daten für die Stoffstromanalyse der Entsorgungsphase von Gebäuden vorlagen. Dennoch wurden für die Ökobilanz der Fallstudie die Treibhausgasemissionen für das Modul C bilanziert. Aufgrund der CO₂-Bindung von Holz fallen beim Holzbau, wie in Abbildung 41 ersichtlich, positive Treibhausgasemissionen hauptsächlich im Modul C an. Würden nur die Herstellung- und Betriebsphase betrachtet werden, so ergäbe sich bei der Verwendung von Holz durch ein negatives Treibhauspotenzial im Modul A und B, ein zu geringer Treibhausgasbedarf. Die Darstellung der Emissionen aus der Abbildung 41, welche zwischen den Emissionen durch Holzwerkstoffe und andere Baumaterialien unterscheidet, macht jedoch deutlich, dass durch andere Baustoffe nur sehr geringe Emissionen im Modul C der untersuchten Fallstudie anfallen. Im Bezug zu den Gesamtemissionen macht die Rückbauphase ohne Holzwerkstoffe knapp 8% aus. Für den Vergleich mit dem abgeleiteten Treibhausgasbudget bedeutet dies, dass der ermittelte Bedarf im Holzbau ca. 8% zu hoch angesetzt wird. Die Gegenüberstellung eines Budgets mit einem Bedarf, der noch zusätzlich das Modul C beinhaltet, führt daher nur in einem geringen Maße zu verzerrten Ergebnissen.

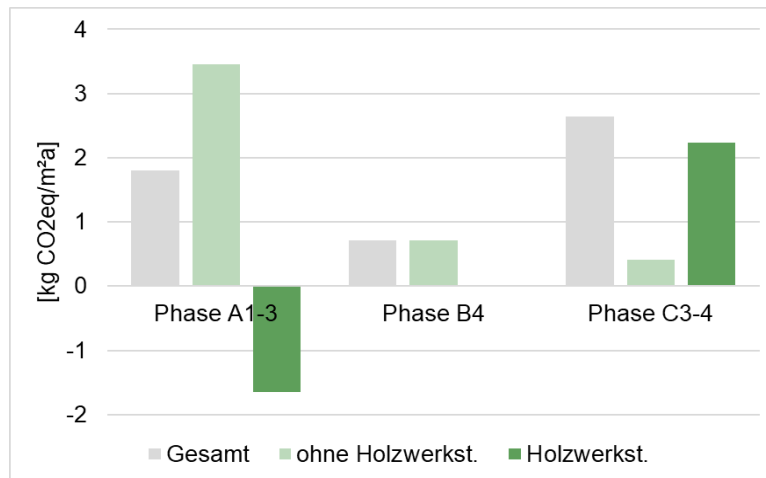


Abbildung 41: Einfluss der Holzwerkstoffe auf den Gesamtbedarf an Treibhausgasemissionen, ohne Sockelwert nach QNG (eigene Darstellung)

Der Vergleich des abgeleiteten Treibhausgasbudgets mit dem berechneten Treibhausgasbedarf für das Wohnen wird auch durch unterschiedliche Gebäudestandards beider Vergleichswerte erschwert. Wie auch in der Auswertung zum Treibhausbudget aufgegriffen, hängt das tatsächliche Treibhausbudget für Wohnraum vom prozentualen Anteil der Wirtschaftssektoren und deren dynamischen Entwicklung ab. Das definierte Budget geht von einer Verteilung aus dem Jahr 2014 und der Prognose zur Zielentwicklung aus dem KSG aus. Würde jedoch ein Budget aufgestellt werden, welches von möglichen, zukünftigen Emissionseinsparungen einzelner Sektoren ausgeht, so würden sich die Anteile der Wirtschaftssektoren eventuell stark zur Verteilung im Jahr 2014 verändern und damit ein anderes Budget ergeben. Die Problematik beim Vergleich liegt daher darin, dass ein Status quo mit einem zukunftsorientierten Bedarf verglichen wird. Es ist beispielsweise davon auszugehen, dass mit dem großen Potenzial zur Emissionsreduktion im Gebäudebetrieb durch neue Energieträger und Fortschritte in der Gebäudetechnik insbesondere für den Gebäudebetrieb ein kleineres Budget benötigt wird. Im Umkehrschluss bedeutet eine, an die Annahmen des Entwurfs angepasste Wirtschaftsprognose gegebenenfalls eine ganz andere Wirtschaftszusammensetzung. Damit würde sich ein anderes Budget und damit möglicherweise eine andere Antwort auf die Frage, wie lange noch Wohnraum innerhalb des Treibhausgasbudgets geschaffen werden kann, ergeben.

Zusätzlich zu schwer einschätzbaren Marktentwicklungen ist auch der Vergleich eines Budgets über einen Top-down-Ansatz mit dem Vergleich eines Bedarfs über einen Bottom-up-Ansatz problematisch. Während das Treibhausgasbudget, angefangen vom globalen verfügbaren Budget, heruntergebrochen ist auf ein Budget für einen einzelnen

Quadratmeter, so werden im Gegensatz dazu die Treibhausgasemissionen des Entwurfs, bezogen auf einen Quadratmeter, auf ganz Deutschland hochskaliert. So stark auch die Bestrebung war, repräsentativen Wohnraum mit Allgemeingültigkeit für Deutschland zu schaffen, entspricht ein Modell nicht vollumfänglich der Realität und ist nur innerhalb seiner eigenen Grenzen gültig. Der Problematik zur Skalierbarkeit umgehen Priore et al. (2021), indem in dieser Studie der Mittelwert für die Emissionen aller Schweizer Gebäude dem Treibhausgasbudget gegenübergestellt wird. Allerdings ist das Ziel der vorliegenden Arbeit ein anderes. Die Forschungsfrage zielt darauf ab, dass mit dem Entwurf der Aufstockung die untere Grenze definiert wird, bei welcher mit so wenig wie möglich Emissionen Wohnraum hergestellt werden kann. Statt eines Mittelwertes der aktuellen Emissionen beim Bau von Wohnraum dürften für die Beantwortung der Forschungsfrage nur Gebäude betrachtet werden, die wie der Entwurf für die Fallstudie besonders CO₂-arm geplant sind. Eine Erhebung von Treibhausgasemissionen bei der Schaffung emissionsreduzierter Gebäude in Deutschland wurde aber noch nicht durchgeführt. So fordert auch die DGNB eine groß angelegte Studie, um einen durchschnittlichen Emissionsbedarf besonders treibhausgasarmer Wohngebäude zu erhalten (Braune et al., 2021, S. 14).

Noch nicht abschließend geklärt ist außerdem, wie viele Emissionen für das Wohnen benötigt werden, wenn die Potenziale für Aufstockungen ausgeschöpft sind. Mit einem Vergleich zu anderen Arten der Wohnraumschaffung, kann beispielsweise herausgefunden werden, wie sich die Emissionen für einen m²(NGF) unterscheiden, wenn der Bestand abgerissen und alle Wohnungen neu errichtet werden würden. Außerdem kann so ein vergleichendes Szenario aufgestellt werden, das aufzeigt wie viele Emissionen benötigt werden würden, wenn das Potenzial von Aufstockungen nicht genutzt werden würde. Zusätzlich zu einem Emissionsbedarfswert für die Erschaffung von Wohnraum, ist die Berechnung eines durchschnittlichen Emissionsbedarfs zur Wiederherstellung oder Ertüchtigung von Wohnraum sinnvoller Gegenstand weiterer Studien. In Kombination mit den Ergebnissen dieser Arbeit kann damit herausgefunden werden, wie viel länger das Treibhausgasbudget für das Wohnen bei verminderten Betriebsemissionen des Bestands hätte.

Neben den genannten Grenzen beim Vergleich der Teilergebnisse zum vorhandenen Treibhausgasbudget und dem Bedarf an Treibhausgasemissionen soll abschließend deutlich gemacht werden, dass es von besonderer Bedeutung ist welche Werte verglichen werden und in den Kontext zueinander oder zur Literatur gestellt werden.

Insbesondere der Vergleich von Grauen Emissionen birgt die Gefahr unterschiedliche Einheiten miteinander zu vergleichen. Die direkte Gegenüberstellung des ermittelten maximalen Treibhausgasbudgets je m² Nettogrundfläche und Jahr mit den benötigten Treibhausgasemissionen je m² und Jahr, verdeutlicht diese Feststellung. Während sich der Jahresbezug des Treibhausgasbudgets auf die noch verfügbaren Jahre bis Budgetende bezieht, nimmt die Zeiteinheit im Nenner des Treibhausgasbedarfs Bezug auf die Jahre innerhalb des Betrachtungszeitraums eines Gebäudes, hier 50 Jahre. Der Zeitbezug „pro Jahr“ von Budget und Bedarf ist demzufolge nicht identisch. Eine direkte Gegenüberstellung von Budget und Bedarf ist nur dann möglich, wenn das Budget durch die Jahre des Betrachtungszeitraums aus der Bedarfsbilanz geteilt wird. Konkret beschreibt das Treibhausgasbudget der Grauen Emissionen von 1000,41 kgCO₂eq/m²a Emissionen pro Quadratmeter über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Dieser Wert muss also mit dem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren dividiert werden, um ihn in den direkten Vergleich zum berechneten Bedarf von 7 kgCO₂eq/m²a zu stellen. Im Ergebnis würde rechnerisch ein fast dreimal höheres Budget von 20 kgCO₂eq/m²a zur Verfügung stehen, wenn das Szenario der Klimaneutralität bis 2029 mit maximal 1,5°C Erderwärmung erreicht werden soll

Für die Betriebsemissionen spielt beim Vergleich von Budget und Bedarf der Zeitbezug allerdings keine Rolle, da nicht wie bei der Konstruktion der Gesamtbedarf auf die Betriebsjahre aufgeteilt werden müssen. Stattdessen wird in der Ökobilanzierung davon ausgegangen, dass der Betrieb, unabhängig des Betrachtungszeitraums, immer die gleichen Emissionen pro Jahr benötigt. Dennoch gibt es auch hier eine Einschränkung des errechneten Bedarfs an Emissionen im Betrieb von Aufstockungen zum verfügbaren Emissionsbudgets. Zwar benötigt ein CO₂-optimierter Betrieb gemäß den Erkenntnissen dieser Arbeit nur 18,12 kgCO₂eq/m²(NGF)a. Der Betrieb von Wohngebäuden würde also innerhalb des definierten Klimaziels mit berücksichtigtem Reduktionsszenario möglich sein. Allerdings benötigen die bestehenden Wohngebäude sehr viel mehr Treibhausgasemissionen für den Betrieb. Das Treibhausgasbudget für den Betrieb definiert somit eine Grenze, wie viele Emissionen allen Wohngebäuden pro m² im Betrieb zur Verfügung stehen. Gleichzeitig beschreibt der Treibhausgasbedarf für den Betrieb einen unteren Emissionsgrenzwert bis zu welchem es heute möglich ist, Gebäude zu betreiben. Der benötigte Bedarf an Betriebsemissionen pro Jahr und Quadratmeter wäre bei der korrekten Gegenüberstellung demnach deutlich höher, wie die Ergebnisse aus Kapitel 4 zeigen. Doch selbst wenn der Betrieb des Bestands zum jetzigen Zeitpunkt

einbezogen wird, ist die Sanierungsrate und damit eine zunehmende Verringerung benötigter Betriebsemissionen im Bestand nicht berücksichtigt.

Abschließend betrachtet, führen die aufeinander aufbauenden Forschungsfragen dazu, dass Annahmen, die zur Beantwortung einer Fragestellung getroffen wurden Einfluss auf alle weiteren darauffolgenden Ergebnisse haben. Das Herausarbeiten von Variablen, wie in Abbildung 40, ist daher von besonderer Bedeutung. So kann zu jedem der Anknüpfungspunkte im Bezug zum THG-Budget oder THG-Bedarf eine genauere Untersuchung durchgeführt oder veränderliche Prozesse präziser dargestellt werden, ohne das Gesamtbild aus den Augen zu verlieren. Bei der Gegenüberstellung von THG-Budget und THG-Bedarf für das Wohnen, kann davon ausgegangen werden, dass das für diese Arbeit definierte THG-Budget durch den Einbezug der Modernisierung etwas zu hoch ausfällt. Ausgleichend dazu, ist das abgeleitete Budget etwas zu gering definiert, in dem das Modul C vernachlässigt werden musste. Durch diese Diskussion ist außerdem klar geworden, dass der Vergleich mit anderen Studien nur bei genauer Prüfung der Systemgrenzen und Bezugseinheiten der zu vergleichenden Budgets möglich ist. Die Erkenntnis dieser Arbeit, dass für ein 1,5°C-Ziel ab Mitte 2023 alle Wohngebäude klimaneutral betrieben werden müssten und ab Winter 2043 auch die Konstruktion von Wohngebäuden keine Emissionen mehr benötigen dürften, stellt auf Grund der vielen Variablen eine erste, aber realistische Orientierung dar. Dennoch ist zu erwarten, dass sich diese Zeiträume bis zum Ende des THG-Budgets mit neuen Ergebnissen aus der Forschung in der Realität verkürzen oder verlängern.

6. Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen zusammengefasst und ein Ausblick auf daran anknüpfende und ergänzende Forschungen, sowie deren Anwendungsmöglichkeiten gegeben. Zuerst werden dazu die Forschungsfragen beantwortet und die aufgestellte Hypothese bewertet. Daraufhin sind Forschungslücken bei der Untersuchung ökologisch optimierter Gebäude und bei der Aufstellung eines Treibhausgasbudgets für den Gebäudesektor aufgezeigt. Schließlich werden Handlungsfelder für einzelne Interessenvertreter aufgestellt.

6.1.1. Zusammenfassung

Mit dem Ziel ein holistisches Bild zu schaffen, welches die Verbindung vom einzelnen Projekt zum globalen Problem des Klimawandels herstellt, wurde in dieser Arbeit über einen Top-down Ansatz ein Treibhausgasbudget für den Wohnungsbau abgeleitet und dieses, unter der Berücksichtigung aktueller Bedarfsdynamiken, den Emissionen eines konkreten Bauprojektes gegenübergestellt.

Die Grundlagenermittlung diente dazu den kontextuellen Rahmen der Arbeit zu schaffen. Für die Beantwortung der Frage, wie lange es noch möglich ist innerhalb der verfügbaren Ressourcen Wohnraum zu schaffen, ist der aktuelle Wissensstand je Themenfeld dargelegt. Zudem werden fehlende Informationen aus diesem Wissensstand aufgezeigt. Mit dem Wissen über die Belastbarkeit des Klimas und schon existierender Klimaziele, wurde die Grundlage zur Definition von Treibhausgasbudgets gelegt. Dabei wurde deutlich, dass existierende Budgets zu spezifisch und intransparent sind, damit diese sich zur Beantwortung der Forschungsfrage eignen. Deren Methodik, allerdings, ist die Basis des hier entwickelten Treibhausgasbudgets für das Wohnen. Die anschließende Analyse aktueller, deutscher Bevölkerungs- und Wohnflächenbedarfsentwicklungen konnte einen voraussichtlichen Jahresbedarf von 400.000 Wohnungen in deutschen Bedarfsregionen ermitteln. Die Ergebnisse dieser Recherche stellen die wissenschaftliche, aber dynamische Grundlage für ein Budget dar, welches den deutschen Wohnraum adressiert. Daraufhin wird mit dem baurechtlichen Rahmen und der Recherche zu baukonstruktiven Strategien für emissionsarmes Bauen der Gestaltungsspielraum für den beispielgebenden Entwurf definiert. Dabei bildet das Wissen zu den Merkmalen von Gebäuden aus den 50er Jahren die Ausgangslage, um den Bestand der

Fallstudie für dessen Umgang im späteren Entwurf einschätzen zu können. Die Erläuterung zu den Grundlagen der Ökobilanz stellen den Hintergrund für die spätere Durchführung der Lebenszyklusanalyse dar. Außerdem wird aufgezeigt, dass es noch keine genormte Methode für die Ökobilanzierung von Aufstockungen gibt und deshalb eine eigene Strategie für die LCA der Fallstudie verfolgt werden muss.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Grundlagen und über die Durchführung der Fallstudie konnten die folgenden, aufeinander aufbauenden Forschungsfragen beantwortet und Stellung zur Hypothese genommen werden.

F1: Wie viele Treibhausgasemissionen werden dem deutschen Bausektor von globalen Emissionsbudget zugeschrieben?

Für das Ziel die Erderwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% auf maximal 1,5°C zu begrenzen und mit der Annahme einer linearen Emissionsreduktion, stehen dem Betrieb von Wohngebäuden und deren Konstruktion unterschiedlich große Budgets zur Verfügung. In Deutschland und für das Startjahr 2021 stehen dem Betrieb von Wohngebäuden noch 600,9 MtCO₂eq und der Konstruktion von neuen Wohnungen noch 236,66 MtCO₂eq zu.

F2: Wie viel Wohnraum wird in Deutschland benötigt und wie hoch ist das Potenzial diesen durch Aufstockungen zu decken?

Unter Berücksichtigung der Bevölkerungsdynamiken und den Trends der Wohnungsnachfrage konnte ein Bedarf von ca. 400.000 Wohnungen pro Jahr in Deutschland ermittelt werden. Dabei hat eine Wohnung in den Bedarfsregionen eine durchschnittliche Wohnfläche von 76,3m². Das führt zu einem Wohnflächenbedarf von ca. 30,5 Mio. m² pro Jahr.

Werden die Annahmen aus der Deutschlandstudie (Tichelmann et al., 2016) übernommen, so könnten konservativ angenommen 84,2 Mio. m² Wohnfläche über Aufstockungen hergestellt werden. Zusätzlich stehen aber noch weitere 31,8 Mio. m² erschließbare Wohnfläche durch Aufstockungen zur Verfügung. Diese zusätzliche Fläche ergibt sich durch Gebäude aus Eigentümergemeinschaften und Gebäuden mit Baujahren vor 1950. Damit könnte Wohnraum für 2,7 Jahre bzw. 3,8 Jahre über Aufstockungen hergestellt werden.

F3: Welche konstruktiven Kriterien bestimmen den CO₂-Fußabdruck von Wohnraum, insbesondere von Aufstockungen, maßgeblich und wie werden diese nach heutigem Stand der Technik ausgeführt?

Über die Untersuchung der Rahmenbedingungen und die Ökobilanzierung konnte festgestellt werden, dass sich die maßgeblichen konstruktiven Variablen für den Treibhausgasbedarf bei Aufstockungen auf das angestrebte Energieniveau und die Kubatur, die Auswahl der Baustoffe, den Bauteilaufbau im Detail und die Bauweise konzentrieren. Hinzu kommen die in Wechselwirkung zu den vorgenannten Variablen stehenden Annahmen zur Gebäudetechnik, dem Energieträger und die Annahmen zum Gebäudebetrieb. Zu diesen Kriterien haben außerdem der Zustand und die Qualität des Bestands und die Vorgaben aus dem Standort einen entscheidenden Einfluss auf das Treibhausgaspotenzial der Baumaßnahme.

Wie diese Kriterien nach heutigem Stand ausgeführt werden können, wurde anhand eines konkreten Entwurfs in Grundriss-, Schnitt- und Detailplänen dargestellt (vgl. Anhang D).

F4: Wie viele Treibhausgase werden bei emissionsoptimierter Konstruktion pro Quadratmeter Nettogrundfläche durch Aufstockungen emittiert?

Für die emissionsoptimierte Aufstockung innerhalb dieser Arbeit wurde ein Emissionsbedarf von insgesamt 15,12 kgCO₂eq/m²(NGF)a ermittelt. Dabei werden bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren 7 kgCO₂eq/m²(NGF)a für die Konstruktion und rund 18 kgCO₂eq/m²(NGF)a zum Betrieb eines Quadratmeters Nettogrundfläche benötigt. Die Emissionen werden allerdings, wie in Kapitel 5 diskutiert, etwas höher eingeschätzt, da voraussichtlich noch Nachrüstungsmaßnahmen im Bestand zur Baumaßnahme hinzukommen.

Kernfrage:

Wie lange ist es noch möglich innerhalb des verfügbaren deutschen THG-Budgets ausreichend Wohnraum, insbesondere durch Aufstockungen, in Deutschland zu schaffen?

Hypothese:

Bei flächen- und emissionseffizienter Wohnraumerweiterung kann, bis zur politisch angestrebten Klimaneutralität im Jahr 2045, ausreichend Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgas-Budgets hergestellt werden.

Die Beantwortung der Forschungsfragen führt schließlich zur Kernfrage und widerlegt die zu Anfang aufgestellte Hypothese. Auf der Grundlage aller Annahmen dieser Arbeit und beginnend mit dem Jahr 2021, kann noch ca. 22,9 Jahre neuer Wohnraum geschaffen werden. Für den Betrieb von Wohngebäuden stehen bei aktueller Entwicklung, nur noch für ca. 2,4 Jahre genügend Treibhausgasemissionen zur Zielerreichung zur Verfügung. Das bedeutet, dass für ein 1,5°C-Ziel ab Mitte 2023 alle Wohngebäude klimaneutral betrieben werden müssten und ab Winter 2043 auch die Konstruktion von Wohngebäuden keine Emissionen mehr benötigen dürften.

Allerdings ist bei diesen Ergebnissen die begrenzte Möglichkeit der flächen- und ressourcensparende Wohnraumschaffung durch Aufstockung noch nicht berücksichtigt. Wie Kapitel 4.1 aufzeigt, reicht das Potenzial an aufstockbaren Wohngebäuden noch maximal 3,8 Jahre lang aus. Nach 3,8 Jahren steigen demnach die Emissionen für die Konstruktion von Wohnraum voraussichtlich durch die Erschöpfung dieser emissionsparenden Wohnraumschaffung. Der berechnete, noch zur Verfügung stehende Zeitraum von 22,9 Jahren zur Konstruktion von Wohnraum wird dementsprechend in der Realität voraussichtlich noch einmal kürzer ausfallen.

Somit kann bewiesen werden, dass es selbst, wenn aller benötigter Wohnraum in besonders emissionsarmer Bauweise hergestellt werden würde, nicht möglich ist innerhalb des deutschen Treibhausgasbudgets zu bleiben, um somit eine maximale Erderwärmung von 1,5°C nicht zu überschreiten.

Die vielen Variablen aus der Hypothese verdeutlichen jedoch den großen Handlungsspielraum, der zur Verfügung steht, das Klimaziel von maximal 1,5°C Erderwärmung dennoch zu erreichen. Obwohl diese Arbeit schon Antworten bietet, verbirgt sich hinter jeder Variablen noch ungenutztes Potential. Es muss daher hinterfragt werden, was es wirklich heißt „flächen- und ressourcenschonend“ zu bauen oder wie viel Wohnraum tatsächlich „ausreichend“ ist. Daneben ist zu prüfen, ob das „politisch angestrebte Ziel“ das Richtige ist. Schlussendlich definieren die Anteile einzelner Sektoren das ausschlaggebende „verfügbare deutsche Treibhausgasbudget“ und weisen somit, je nach Reduktionspotenzial, mehr Emissionsbudget für Bereiche mit geringen Einsparmöglichkeiten auf. Im Folgenden Unterkapitel wird aufgezeigt, wo aus den Erkenntnissen und auf Grundlage dieser Arbeit noch Forschungsbedarf besteht und welche Handlungen von der Politik in Zusammenarbeit mit der Wissenschaft für die Zukunft gefordert sind.

6.1.2. Ausblick

Mit dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass das verfügbare deutsche Treibhausgasbudget nur noch maximal 2,4 Jahre für den Betrieb und weniger als 22,9 Jahre für die Konstruktion von Wohnraum ausreicht. Somit würden innerhalb kurzer Zeit die Emissionsgrenzen überschritten werden. Auch wenn die hier aufgestellte Prognose zum Ende des Treibhausgasbudgets durch die vielen Variablen nur eine Abschätzung darstellt, wird dennoch die Größenordnung der dringenden Handlungsnotwendigkeit klar. Das Kernproblem in der Baupraxis innerhalb verfügbarer THG-Emissionen zu handeln, besteht darin, dass kein konkretes Richtmaß besteht, mit welchem der Erfolg zur Emissionsreduktion gemessen werden kann. Daraus ergeben sich zwei Forschungsschwerpunkte.

Vorrangiges Ziel ist es die benötigten Treibhausgasemissionen, wo möglich, auf ein Minimum zu begrenzen. Die eigene Studie zeigt auf, welche Variablen dabei eine besonders große Rolle im Wohnungsbau spielen. Sie ermittelt über die durchgeführte Fallstudie einen Vergleichswert zum Treibhausgasbedarf von Wohnraum, womit ähnliche Bauvorhaben hinsichtlich ihrer Emissionen eingeschätzt werden können. Damit sich Gebäude allerdings belastbarer einordnen lassen, ob sie im Vergleich zu Referenzprojekten gut oder schlecht abschneiden, sind offizielle Benchmarks aus der Baupraxis ein wichtiges, zu entwickelndes Werkzeug. Zur Entwicklung von Benchmarks sind jedoch größer angelegte und nach Systemgrenzen differenzierte Studien notwendig. Sinnvoll wären Studien, die in einheitlicher Methodik den Einfluss der Variablen aus Kapitel 3.2 und 3.3 und deren Wechselwirkungen herausarbeiten. Dieses sollten die Ergebnisse zudem auf Bauteilebene und je nach Nutzung und Größe der Baumaßnahme aufbereiten. Auch der Einfluss veränderter Ausgangsbedingungen, wie ein dekarbonisierter Energiemix oder das Potenzial von Gebäuden als Kohlenstoffspeicher, sollten überprüft werden. Benchmarks, die unter diesen Einsparpotenzialen entwickelt werden, könnten dann wiederum Einfluss auf das verfügbare Budget pro Quadratmeter haben.

Während technische Optimierungsmöglichkeiten schon seit langem erforscht werden und daher voraussichtlich nur zu relativ kleinen Erfolgen führen, so liegt großes Potenzial in alternativen Wohnformen und der verstärkten Nutzung des Bestands. Um emissionsintensiven Neubau zu verhindern, müssen daher Strategien entwickelt werden, wie der Bestand in einem noch viel größeren Maßstab genutzt werden kann. Darüber hinaus

liegt ein noch weitestgehend unerforschtes und ungenutztes Potenzial Emissionen beim Bauen einzusparen in alternativen Wohnkonzepten. Wird beispielsweise hinterfragt wie viel Wohnfläche tatsächlich benötigt wird oder welche Flächen gemeinschaftlich oder für mehrere Zwecke genutzt werden können, so könnte sich der Wohnflächenbedarf und somit der absolute Emissionsbedarf erheblich verringern. Auch die Idee kreislauffähiger Gebäude und Wohnformen kann ein zusätzlicher Lösungsansatz zur Verringerung der benötigten Treibhausgasemissionen beim Bauen sein.

Der zweite, wichtige Forschungsschwerpunkt ist die klare Definition und ein kohärenter Ansatz für ein Treibhausgasbudget. So kann verhindert werden, dass je nach Interessenvertretung ein unterschiedliches Budget definiert wird. In einem ersten Schritt sollte auf Grundlage der hier durchgeführten, statischen Budgetierungsmethode ein dynamisches Modell entwickelt werden. Dieses sollte sowohl die Dekarbonisierung des Energiemix, volatile Bevölkerungsentwicklungen und Wohnungsnachfragen, sowie unterschiedliche Reduktionsszenarien berücksichtigen. Zudem sollte auch der Einfluss aller Variablen aus Kapitel 3.1 quantifiziert werden und eine umfangreiche, aktuelle Stoffstromanalyse durchgeführt werden. Ähnlich wie die Entwicklungspfade aus den Berichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) könnten somit einzuhaltende Emissionskorridore herausgearbeitet werden. Wesentlich ist allerdings die Herausforderung Treibhausgasbudgets in die Praxis zu implementieren. Mit dem Wissen zum Einfluss der Variablen auf das Budget könnte das komplexe Modell der Treibhausgasbudgetierung systematisch und transparent vereinfacht werden und die Grundlage für rechtsverbindliche Treibhausgasbudgets bilden.

Zusammenfassend soll nach Abschluss dieser Studie die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik als essenzielle Grundlage zur erfolgreichen Reduktion der THG-Emissionen beim Bauen herausgestellt werden. Innerhalb der Ressourcen bauen zu können, erscheint dann möglich, wenn jede*r Akteur*in beim Bauen konkret innerhalb fairer, global gültiger und rechtsverbindlicher Treibhausgaslimits agieren kann. Damit ein minimaler Emissionsverbrauch realisiert werden kann, verspricht ein überholtes Verständnis zum Flächenbedarf und der Art des Zusammenlebens zum einen den Bestand effektiver ausnutzen zu können und zum anderen Neubau bedarfsgerecht zu gestalten. Für die Baupraxis müssen daher zusätzlich zur Messbarkeit Lösungen hinsichtlich Suffizienz und Konsistenz auf Gebäude- und Stadtebene entwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- Ahnert, R. & Krause, K. H. (2009). *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960* (7., durchges. und korr. Aufl.). Huss.
- Batran, L. (2021). *Die Änderungen der Bayerischen Bauordnung 2021*. Zugriff am 05.11.2021, verfügbar unter <https://www.feuertrutz.de/die-aenderungen-der-bayerischen-bauordnung-2021-15042021>
- BauNetz. (2022a). *Mindestluftwechsel | Fassade | Glossar | Baunetz_Wissen*. Zugriff am 26.05.2022, verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/glossar/m/mindestluftwechsel-48377>
- BauNetz (2022b). *Treibhauspotenzial | Gebäudetechnik | Glossar | Baunetz_Wissen. BauNetz*. <https://www.baunetzwissen.de/glossar/t/treibhauspotenzial-6305134>
- BYAK-Bayerische Architektenkammer. (2021, 3. November). *Bauordnungsrecht - Bayerische Architektenkammer*. Zugriff am 03.11.2021, verfügbar unter <https://www.byak.de/planen-und-bauen/recht-und-berufspraxis/baurecht/bauordnungsrecht.html>
- Bayrische Bauordnung vom 14. August 2007 (GVBl.S.588, BayRS 2132-1-B), die zuletzt durch §4 des Gesetzes von 25. Mai 2021 (GVBl.S286) geändert worden ist, Bayrische Staatskanzlei (2021).
- Benz, S., Henschke, C., Pischzan, T. & Ruhr-Lotz, M. (2018). *Argumentationshilfe zur Förderung von Dachbegrünung*. Kassel.
- Berthold, M. (2022). *Planungskennwerte*. TU Wien. Zugriff am 15.02.2022, verfügbar unter http://zeus.h1arch.tuwien.ac.at/tuwis_img/berthold/planB/Berthold-Diplom-Planungskennwerte.pdf
- Braune, A., Ekhvaia, L. & Quante, K. (2021). *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion*.
- Brejndorf, K. N., Kalbar, P., Petersen, S. & Birkved, M. (2017). The absolute environmental performance of buildings. *Building and Environment*, 119, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.003>
- Buhofer, S. (2021). *Treibhausgasemissionen verstehen: Der Klimawandel im Kontext von Wissenschaft und Politik*. oekom. https://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783962388508
- Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist (2021). https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/inhalts_bersicht.html
- BBSR-Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2015). *Wohnungsmarktprognose 2030*. Bonn.
- BBSR-Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2017a). *Aktuelle Trends der Wohnungsbautätigkeit in Deutschland: Wer baut wo welche Wohnungen?* Bonn.
- BBSR-Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2017b). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen*.
- BBSR-Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2019). *Vergleichswerte für den Energieverbrauch*.
- BBSR-Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2020). *Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland: Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt*.

- BBSR-Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2021a). *BBSR legt neue Bevölkerungsprognose für die Stadt- und Landkreise vor*. Zugriff am 09.05.2022, verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/startseite/topmeldungen/bevoelkerungsprognose-bbsr-2040.html>
- BBSR-Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2021b). *Raumordnungsprognose 2040*. Bonn.
- Bundesregierung. (2022). *Bauen und Wohnen*. Zugriff am 14.06.2022, verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundlich-wohnen-1672900>
- bwp-Bundesverband Wärmepumpe. (2020). *Klimakarte*. Zugriff am 28.06.2022, verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/klimakarte/>
- CRREM-Carbon Risk Real Estate Monitor. (2019). *Stranding Risk & Carbon: Science-based decarbonising of the EU commercial real estate sector*.
- Dangel, U. (2017). *Wendepunkt im Holzbau: Neue Wirtschaftsformen*. Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035608595>
- DGNB-Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen. (2020). *Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte*.
- DWD-Deutscher Wetterdienst. (2021). *Klimavorhersagen und Klimaprojektionen: Wie entstehen Aussagen über das künftige Klima*. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- DIN EN 15978:2012-10 (2012). *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode* (DIN EN 15978:2012-10). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 14040:2009-11 (2009). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen* (DIN EN ISO 14040:2009-11). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Drexler, H. & El-khouli, S. (2012). *Nachhaltige Wohnkonzepte: Entwurfsmethoden und Prozesse* (1. Aufl.). *Edition Detail*. Inst. für internat. Architektur-Dokumentation.
- Ebert, S. (2019). *Vorlesung: Einführung in die Ökobilanzierung*.
- Europäisches Parlament. (2021). *Was versteht man unter Klimaneutralität?* Zugriff am 03.07.2022, verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190926STO62270/was-versteht-man-unter-klimaneutralitaet>
- Fa. Lindner. (2020). *FLOOR and more® | Der Klassiker unter den Trockenholböden | Lindner Group*. Zugriff am 28.06.2022, verfügbar unter https://www.lindner-group.com/de_DE/ausbauprodukte/boden/hohlboden/floor-and-morer/
- Fath, M., Storck, M., Kurzer, C., Willmy, S., Schridde, J., Sieder, M., Hafner, A., Winter, S. & Kessel, T. (2019). *Leitlinie zur Vereinfachung der Planung und Durchführung von Aufstockungs- / Erweiterungsmaßnahmen als Nachverdichtungsmaßnahme in innerstädtischen Bereichen*. Braunschweig.
- Friedrichsen, S. (2018). *Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen: Kriterien für Neubau und Bauen im Bestand* (2. Auflage). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56553-7>
- Gangoly, H., Holzer, P. & Maydl, P. (2018). *Ziegel im Hochbau: Theorie und Praxis. Baukonstruktionen: Sonderband*. Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035616163>
- Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., Musso, F., Petzinka, K.-H. & Rudolphi, A. (2008). *Atlas Sanierung: Instandhaltung, Umbau, Ergänzung* (1. Aufl.). Birkhäuser; Ed. Detail. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614344>
- Gräfe, M., Merk, M., Werther, N., Fülle, C., Leoppold, N., Sprinz, D., Brunn, M. & Busch, M. (2015). *Regeldetailkatalog für den mehrgeschossigen Holzbau in*

- Gebäudeklasse 4: Schlussbericht. Bauforschung für die Praxis: Bd. 111.*
Fraunhofer IRB Verlag.
- Grimm, R. (2019). *Welche Leichtbeton-Arten gibt es? - baustoffwissen*. Zugriff am 18.11.2021, verfügbar unter https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/boden_und_wand/welche-leichtbeton-arten-gibt-es/
- Grimm, R. (2021). *Was versteht man unter „Mindestluftwechsel“?* Zugriff am 26.05.2022, verfügbar unter <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/bauelemente/mindestluftwechsel-vorschrift-luftaustausch-lueftung/>
- Habert, G., Röck, M [Martin], Steininger, K [Karl], Lupísek, A., Birgisdottir, H., Desing, H., Chandrakumar, C., Pittau, F., Passer, A [Alexander], Rovers, R., Slavkovic, K., Hollberg, A., Hoxha, E [Endrit], Jusselme, T., Nault, E., Allacker, K. & Lützkendorf, T. (2020). Carbon budgets for buildings: harmonising temporal, spatial and sectoral dimensions. *Buildings and Cities*, 1(1), 429–452. <https://doi.org/10.5334/bc.47>
- Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2007). *Energie-Atlas: Nachhaltige Architektur* (1. Aufl.). *Edition Detail*. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614498>
- Herzog, T. (Hrsg.). (2003). *Edition Detail. Holzbau-Atlas* (4. Aufl.). Institut für Internationale Architektur-Dokumentation. <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz111719852cov.htm> <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614580>
- Hollberg, A., Lützkendorf, T. & Habert, G. (2019). Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process. *Building and Environment*, 153, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.026>
- Hollberg, P. (2016). CAALA (Version V1.22.6.9) [Computer software]. <https://lca.caala.de/#/login?r=/>
- Hoxha, E [E.], Röck, M [M.], Truger, B., Steininger, K [K.] & Passer, A [A.] (2020). Austrian GHG emission targets for new buildings and major renovations: an exploratory study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588(3), 32052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/3/032052>
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). 1,5 °C globale Erwärmung: Häufig gestellte Fragen und Antworten. In: Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/07/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf
- IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *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*.
- Kasang, D. (2020). *Die aktuellen SSP-Szenarien*. Zugriff am 26.11.2021, verfügbar unter <https://klimanavigator.eu/dossier/artikel/085116/index.php>
- Kaufmann, H. (2017). *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau: DETAIL Atlas. Detail Atlas Ser.* Detail Business Information GmbH The. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4943513>
- Keller, H. (2012). Definition: Remanenzeffekt. *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/remanenzeffekt-53081>

- Kersting, S. (2022, 27. April). *Bauministerin Geywitz will 400.000 neue Wohnungen jährlich*. Zugriff am 14.06.2022, verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/wohnraum-bundesbauministerin-geywitz-haelt-trotz-problemen-am-ziel-von-400-000-neuen-wohnungen-fest/28282630.html>
- Klimafakten. (2015). *Behauptung: „Die berühmte „Hockeyschläger“-Kurve ist eine Fälschung“*. Zugriff am 25.11.2021, verfügbar unter <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-die-beruehmte-hockeyschlaeger-kuurve-ist-eine-faelschung>
- König, H. (2017). *Projekt: Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden.pdf: Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten*. Gröbenzell.
- König, H., Kohler, N., Kreißig, J. & Lützkendorf, T. (2009). *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge* (1. Aufl.). Edition Detail Green Books. Inst. für Int. Architektur-Dokumentation Ed. Detail.
- Loga, T., Stein, B., Diefenbach, N. & Born, R. (2015). *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Darmstadt.
- Mahler, B. Dr., Idler, S., Nusser, T. & Ganter, J. Dr. (2019). *Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus*. Dessau-Roßlau.
- Meyer, U. & Gierga, M. (2012). *Bauen im Bestand - Materialkennwerte von historischem Ziegelmauerwerk*.
- Millar, R. J., Fuglestvedt, J. S., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M. J., Matthews, H. D., Skeie, R. B., Forster, P. M., Frame, D. J. & Allen, M. R. (2017). Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C. *Nature Geoscience*, 10(10), 741–747. <https://doi.org/10.1038/ngeo3031>
- Mooser, M., Forestier, M., Pittet-Baschung, M. & Büren, C. von. (2014). *Aufstocken mit Holz - Verdichten, Sanieren, Dämmen*. Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783038212829>
- Müller, P. L. (2015). *Urbane Ressourcen: Aufstocken, verdichten, umnutzen*. Architektur. R. Müller.
- Nisse, J. & Armbrrecht, K. (2020). Nachhaltigkeitsaspekte unter der Lupe: Ökobilanzen im Gebäudevergleich. *Mauerwerk*, 24(3), 118–123. <https://doi.org/10.1002/dama.202000007>
- Pálenský, D. & Lupíšek, A. (2019). Carbon Benchmark for Czech Residential Buildings Based on Climate Goals Set by the Paris Agreement for 2030. *Sustainability*, 11(21), 6085. <https://doi.org/10.3390/su11216085>
- Passivhaus Institut. (2021, 8. Oktober). *Qualitätsanforderungen an Passivhäuser*. Passivhaus Institut. Zugriff am 12.11.2021, verfügbar unter https://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm
- Passivhaus Institut. (2022, 24. Mai). *Kostengünstige Passivhäuser in Mitteleuropa*. Passivhaus Institut. Zugriff am 30.05.2022, verfügbar unter https://passiv.de/de/02_informationen/05_ph-mittleuropa/05_ph-mittleuropa_mehr.htm
- Priore, D., Jusselme, T. & Habert, G. (2021). *Deriving global carbon budget for the Swiss built environment*.
- Püschel, D. & Teller, M. (Hrsg.). (2013). *Umweltgerechte Baustoffe: Graue Energie und Nachhaltigkeit von Gebäuden*. Fraunhofer IRB Verl.
- QNG-Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude. (2021). *Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude: Anhang 3.1.1 zur Anlage 3*. <https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/QNG->

BEG/QNG_GMS_311_Anlage_3_LCA_Bilanzregeln_Wohngeb%C3%A4ude_2
10625.pdf

- QNG-Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude. (2022). *Regeln zur Bestimmung des Anforderungswertes für QNG Nichtwohngebäude*.
- Resalati, S., Kendrick, C. C. & Hill, C. (2019). Embodied energy data implications for optimal specification of building envelopes. *Building Research & Information*, 48(4), 429–445. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1665980>
- Röck, M [Martin], Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T. & Passer, A [Alexander] (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., III, Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., Wit, C. A. de, Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., . . . Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>
- Sartori, I. & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
- Sobek, W. & Heinlein, F. (Hrsg.). (2022). *Non nobis – über das Bauen in der Zukunft / Werner Sobek: Buch 1. no nobis-über das Bauen der Zukunft: Ausgehen muss man von dem, was ist.* avedition.
- Stadt Kempten. (2021a). *Flächennutzungsplan*. Zugriff am 28.06.2022, verfügbar unter <https://www.kempten.de/flachennutzungsplan-727.html>
- Stadt Kempten. (2021b). *Verordnung zur einstweiligen Sicherstellung des Baumbestandes in der Stadt Kempten (Allgäu)*.
- Statista. (2021a). *Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2020 | Statista*. Zugriff am 09.12.2021, verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/76558/umfrage/entwicklung-der-treibhausgas-emissionen-in-deutschland/>
- Statista. (2021b). *Wohnfläche je Wohnung in Deutschland nach Bundesländern 2020 | Statista*. Zugriff am 30.12.2021, verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70111/umfrage/wohnflaeche-pro-wohnung-je-bundesland-2007/>
- Statista. (2022a). *Geburten und Sterbefälle bis 2021*. Zugriff am 10.05.2022, verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/161831/umfrage/gegenueberstellung-von-geburten-und-todesfaellen-in-deutschland/>
- Statista. (2022b). *Wohnfläche je Einwohner in Wohnungen bis 2020 | Statista*. Zugriff am 15.06.2022, verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36495/umfrage/wohnflaeche-je-einwohner-in-deutschland-von-1989-bis-2004/>
- Statista. (2022c, 29. Juni). *CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2021 | Statista*. Zugriff am 29.06.2022, verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoehoe-der-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/>
- Destatis-Statistisches Bundesamt. (2021a). *Bautätigkeit und Wohnungen 2020*.
- Destatis-Statistisches Bundesamt. (2021b). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Private Haushalte und Umwelt - Berichtszeitraum 2000 - 2019*. Zugriff am 27.05.2022, verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft->

- Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.html;jsessionid=9644FF54E873F6F6842CAD2949B32E51.live742
Destatis-Statistisches Bundesamt. (2021c). *Wohnen, Auszug aus dem Datenreport 2021*.
- Destatis-Statistisches Bundesamt. (2021d). *Wohnungsbestand Ende 2020: 42,8 Millionen Wohnungen*. Zugriff am 30.12.2021, verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21_326_31231.html;jsessionid=23661A09DB26EB0083E2DF3C71D83995.live731
- Destatis-Statistisches Bundesamt. (2021e). *Wohnungsbestand im Zeitvergleich*. Zugriff am 28.06.2022, verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/liste-wohnungsbestand.html>
- Tichelmann, K., Blome, D., Ringwald, T., Günther, M. & Groß, K. (2019). *Deutschlandstudie 2019: Wohnraumpotenziale in urbanen Lagen, Aufstockung und Umnutzung von Nichtwohngebäuden*.
- Tichelmann, K., Groß, K. & Günther, M. (2016). *Deutschland-Studie 2015: Wohnraumpotentiale durch Aufstockungen*.
- Tichelmann, K. & Pfau, J. (2007). *Trockenbau: Grundlagen, Details, Beispiele* (1. Aufl.). *Detail Praxis*. Edition Detail.
- topographic-map. (2022). *Topografische Karte Kempten (Allgäu), Höhe, Relief*. Zugriff am 28.06.2022, verfügbar unter <https://de-de.topographic-map.com/maps/f1ef/Kempten-Allg%C3%A4u/>
- UBA-Umweltbundesamt. (2020). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018*. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de.pdf
- UBA-Umweltbundesamt. (2021a). *Klimamodelle und Szenarien*. Zugriff am 26.11.2021, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimamodelle-szenarien#gibt-es-auch-regionale-klimamodelle-fur-deutschland>
- UBA-Umweltbundesamt. (2021b). *Kohlendioxid-Emissionen*. Zugriff am 09.12.2021, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen#herkunft-und-minderung-von-kohlendioxid-emissionen>
- UBA-Umweltbundesamt. (2021c). *Treibhausgasminderungsziele Deutschlands*. Zugriff am 22.09.2021, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands>
- UBA-Umweltbundesamt. (2022a). *Beobachtete und künftig zu erwartende globale Klimaänderungen*. Zugriff am 14.06.2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/beobachtete-kuenftig-zu-erwartende-globale#-ergebnisse-der-klimaforschung->
- UBA-Umweltbundesamt. (2022b). *Siedlungs- und Verkehrsfläche*. Zugriff am 11.05.2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#politische-ziele>
- UBA-Umweltbundesamt. (2022c). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland: Treibhausgas-Emissionen nach Kategorien*. Zugriff am 29.06.2022, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>

- Umweltrat. (2021). *Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO2-Budget*.
- UNEP-United Nations Environment Programme. (2021). *2021 Global Status Report for buildings and construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*.
- UNFCCC-United Nations Framework Convention on Climate Change. (1992). *Rahmenübereinkommen der vereinten Nationen über Klimaänderungen*.
- Weidner, S., Mrzigod, A., Bechmann, R. & Sobek, W. (2021). Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. *Beton- und Stahlbetonbau*, Artikel best.202100065. Vorab-Onlinepublikation.
<https://doi.org/10.1002/best.202100065>
- Wittmann, H. (2020). *Klimagerechte Sanierung und Nachverdichtung* [Masterarbeit]. Technische Universität München.
- Wolf, T., Untergutsch, A., Wensing, C., Lu-Pagenkopf, F., Kellenberger, D., Kubowitz, P. & Mittelbach, H. (2020). *Potenziale von Bauen mit Holz: Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise*.
- WBG-World Bank Group. (2021a). *Population, total*. Zugriff am 30.12.2021, verfügbar unter
<https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2019&start=2016>
- WBG-World Bank Group. (2021b). *Population, total - Germany | Data*. Zugriff am 28.06.2022, verfügbar unter
<https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?end=2019&locations=DE&start=2016>
- Zeumer, M. (2014). *Nachhaltig Konstruieren: Vom Tragwerksentwurf Bis Zur Materialwahl - Gebäude ökologisch Bilanzieren und Optimieren*. *DETAIL Green Bks*. Detail Business Information GmbH The.
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5117558>
- Zimmermann, M., Althaus, H.-J. & Haas, A. (2005). Benchmarks for sustainable construction. *Energy and Buildings*, 37(11), 1147–1157.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.017>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methodik zur Beantwortung der Forschungsfrage (eigene Darstellung).....	9
Abbildung 2: Temperaturentwicklung der letzten 1000 Jahre aus dem dritten Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2001, S. 3).....	12
Abbildung 3: Die sozioökonomische Entwicklungspfade des IPCC (UNFCCC, o.D.).....	13
Abbildung 4: Treibhausgasminderungsziele Deutschland (UBA, 2021c).....	16
Abbildung 5: Methodik zur Ableitung eines Treibhausgasbudgets für Gebäude (Habert et al., 2020, 438, Figure 3)	17
Abbildung 6: Entscheidungsmatrix für die Ableitung eines Treibhausgasbudgets für die Konstruktion und den Betrieb von Wohngebäuden in Deutschland (eigene Darstellung)	19
Abbildung 7: Veränderung Bevölkerung und Wohnungsbestand von 2011 bis 2020 (Umweltbundesamt, 2022c).....	22
Abbildung 8: Wohnungsnachfrageverhalten je Altersstruktur (Müller, 2015, S. 19, Abb. 1.11)	23
Abbildung 9: Wohnungsbedarf von 2018-2025 (Tichelmann et al., 2019, S. 21, Abb. 4)	25
Abbildung 10: Strategien des treibhausgasreduzierten Bauens (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 11: Aufbau einer Ökobilanz (eigene Darstellung nach DIN 14040).....	37
Abbildung 12: Methode zur Ökobilanz von Aufstockungen (Fath et al., 2019, S. 114, Abb. 29)	39
Abbildung 13: Schritte bei der Ableitung des Treibhausgasbudgets für das Wohnen (eigene Darstellung).....	41
Abbildung 14 :Nationales Treibhausgasbudget nach KSG (eigene Darstellung)	45
Abbildung 15: Nationales Treibhausgasbudget nach Zieldefinition (eigene Darstellung).....	46
Abbildung 16: Treibhausgasbudget je Sektor für ein 1,5°C-Ziel (eigene Darstellung).....	48
Abbildung 17: Anteile der Treibhausgasemissionen im Hochbau (BBSR, 2020, S. 26, Abb. 8)	49
Abbildung 18: Treibhausgasbudget für Wohngebäude je Handlungsfeld (eigene Darstellung).....	50
Abbildung 19: Treibhausgasbudget je Handlungsfeld und Jahr bei linearer Reduktion (eigene Darstellung)	51
Abbildung 20: Treibhausgasbudget pro m ² und Lebensphase/Handlungsfeld eines Gebäudes (eigene Darstellung)	53
Abbildung 21: Abstandsflächen am Standort in grau gestrichelter Linie (eigene Darstellung).....	57
Abbildung 22 - Gruppierung von Gebäudeanforderungen (eigene Darstellung)	65

Abbildung 23: Einfluss Kompaktheit eines Gebäudes auf den Primärenergiebedarf (Hegger et al., 2007, S. 86, B 3.10).....	70
Abbildung 24: Vergleich der Treibhausgasemissionen verschiedener Kubaturen (eigene Darstellung).....	70
Abbildung 25: Zusammenhang des Primärenergiebedarfs der Konstruktion und des Betriebs von Gebäuden unterschiedlicher Energiestandards (Kaufmann, 2017, S. 27, A4.4).....	71
Abbildung 26: Primärenergieinhalt verschiedener Baugruppen (Hegger et al., 2007, S. 162, B 5.55).....	76
Abbildung 27: Ostansicht des Bestands mit geplanter Aufstockung (eigene Darstellung).....	83
Abbildung 28: Grundriss der Aufstockung (eigene Darstellung).....	84
Abbildung 29: Berücksichtigte Lebenszyklusmodule (eigene Darstellung).....	89
Abbildung 30: Verwendete Methode zur Ökobilanzierung der Fallstudie (eigene Darstellung in Anlehnung an (Fath et al., 2019, S. 114, Abb. 29)).....	90
Abbildung 31: Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus der Fallstudie (eigene Darstellung).....	94
Abbildung 32: Anteil der Rückbauphase an den Gesamtemissionen (eigene Darstellung).....	95
Abbildung 33: Treibhausgasemissionen gesamt, je Lebenszyklusphase, ohne Sockelwert nach QNG (eigene Darstellung).....	96
Abbildung 34: Treibhausgasemissionen der Bauteile total [t CO ₂ eq], Lebenszyklusphasen A1-3, B4, C3+4 (eigene Darstellung).....	97
Abbildung 35: Treibhausgasemissionen, pro Bauteilfläche [kgCO ₂ eq/m ² (NGF),] Lebenszyklusphasen A1-3, B4, C3+4 (eigene Darstellung).....	97
Abbildung 36: Benötigte Treibhausgasemissionen bei der Konstruktion von Wohnraum in Gegenüberstellung zum verfügbaren Budget (eigene Darstellung).....	100
Abbildung 37: Benötigte Treibhausgasemissionen für den Betrieb von Wohnraum in Gegenüberstellung zum verfügbaren Budget (eigene Darstellung).....	101
Abbildung 38: Anteil der Kostengruppe 400 an den Grauen Emissionen der Fallstudie (eigene Darstellung).....	110
Abbildung 39: Treibhausgasemissionen bei Strom aus Windkraft (eigene Darstellung).....	112
Abbildung 40: Variablen des THG-Budgets und des THG-Bedarfs.....	115
Abbildung 41: Einfluss der Holzwerkstoffe auf den Gesamtbedarf an Treibhausgasemissionen, ohne Sockelwert nach QNG (eigene Darstellung).....	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sektorale Emissionszuweisung für die Treibhausgasemissionen von Gebäuden (eigene Darstellung auf Datengrundlage von BBSR, 2020).....	50
Tabelle 2: Berechneter Energiebedarf der Fallstudie	75
Tabelle 3: Produktsystem nach Kostengruppen (eigene Darstellung)	91
Tabelle 4: Berechneter Energiebedarf der Fallstudie	92
Tabelle 5: Verwendete Gebäudetechnik für die Ökobilanz.....	92

Anhangsverzeichnis

- Anhang A Ableitung eines Treibhausgasbudgets (digitaler Anhang)
- Anhang B Anforderungskatalog
- Anhang C Bauteilkatalog (zusätzlich digitaler Anhang)
- Anhang D Lageplan 1:500,
Grundrisse 1:100,
Schnitte 1:100,
Ansichten 1:100,
Fassadenschnitt 1:20
Details 1:5
- Anhang E Ökobilanzierung der Fallstudie (digitaler Anhang)
- Anhang F Gegenüberstellung THG-Budget mit THG-Bedarf
(zusätzlich digitaler Anhang)

Anhang A – Ableitung THG-Budget

Digitaler Anhang

Anhang B - Anforderungskatalog

Standort

1. Vorgaben durch den Standort			Quelle
Hauptkategorie	Unterkategorien	IST-Zustand	Quelle
Bauherr		Vonovia	
Adresse		Fischerösch 18 und 18 1/2, 87435 Kempten (Allgäu)	
Klimaregion		15: Garmisch-Patenkirchen	Klimakarte nach DIN/TS 12831-1:2020-04 und (bwp, 2020)
Geländehöhe		706 - 710m üNN	(topographic-map, 2022)
Baugebiet/Flächennutzung (Art der baul. Nutzung)		Wohngebiet; grenzt an: Mischgebiet (Norden, Osten), an Sondergebiet (Süden), an Wohngebiet (Westen)	(Stadt Kempten, 2021)
Bebauungsplan (Maß der baul. Nutzung)	Grundflächenzahl (GRZ) Geschossflächenzahl (GFZ) Baumassenzahl (BMZ) Bauweise maximale Trauf-/Firsthöhe Dachform Haustypen	nicht vorhanden, es muss "im Zusammenhang gebauter Ortsteile" verfahren werden	§34 BauGB
äußere Lasten auf das Gebäude	Windlast: Windzone	1; 22,5 m/s (Zone mit geringster Windgeschwindigkeit von 4 Zonen)	DIN EN 1991-1-4/NA:2010-13
	Windlast: Geländekategorie	IV; Stadtgebiete	
	Schneelast: Schneelastzone	3; (Schnee ertragsreichste Zone von 3 Zonen)	DIN EN 1991 1-4
	Erdbebensicherheit: Erdbebenzone	0; (risikoärmste Zone von 4 Zonen)	DIN EN 1998-1/NA:2011-02
Brandschutz	brandschutztechnische Gebäudeabstände	für Städte mit weniger als 250.000 Einwohner: 0,4H, min. jedoch 3m Abstandsfläche	Art.6 (5) BayBO

Nutzung

2. Anforderungen/Annahmen aus der Nutzung und zur Anwendbarkeit auf die Forschungsfrage

bezieht sich nur auf die Aufstockung

Hauptkategorie	geplantes SOLL	Abweichung/Vereinfachung im Entwurf	Quelle der Annahme
Nutzung	ausschließlich Wohnen		BayBO
Geschosse	für Architektur: 1 Zusatzgeschoss	für LCA-Berechnungen: 1,3 Geschosse im Mittel	(Tichelmann et al., 2016, S. 26)
Gebäudeklasse (resultierend aus 1-2 Geschosse Aufstockung)	GKL 4; Höhe ≤ 13m, größte NE ≤ 400m²	(Emissionen äquivalent zu einer Verteilung von: 1685 Gebäude eingeschossig, 722 Gebäude zweigeschossig)	
Kubatur	Quader in Verlängerung der Bestands-Außenwände; A/V = 0,935		Art. 2 Abs. (3) BayBO
m²/Person	39,2 m²/Person entspricht der durchschnittlichen Wohnfläche pro Pers. in den TOP7-Metropolen im Jahr 2020		eigener Vergleich der Emissionen verschiedener Kubaturen, Berechnung mit Caala (Destatis, 2021, S. 263–264)
m²/Wohnung	76,3m²/Wohnung entspricht der durchschnittlichen Wohnfläche pro Wohnung in den TOP7-Metropolen im Jahr 2020		(Destatis, 2021, S. 263–264)
Nutzung	ausschließlich Wohnen		
Stellplätze	vernachlässigt		
Barrierefreiheit	min. 1/3 aller Wohnungen barrierefrei... ...nutzbar (Bad, Küche, Schlafzimmer, Rollstuhlstellplatz vor/in der Wohnung (2*1,8x1,5m)) ...und erreichbar (min. 1 Aufzug: Fahrkorb min. 1,1x1,4 m, lichte Türbreite min. 0,9m)		Art. 48, Abs.1, Satz 2; DIN 18040-2 Kapitel 4.3.8 Art. 37, Abs.5
Bauweise	Holztafelbau		(König et al., 2009)

Brandschutz

3. Anforderungen/Annahmen zur Umsetzbarkeit der Fallstudie bezieht sich nur auf die Aufstockung

Hauptkategorie	Unterkategorien	geplantes SOLL	Abweichung/Umsetzung im Entwurf	Quelle der Annahme
Brandschutz		<ul style="list-style-type: none"> - Schutz vor Ausbreitung von Feuer und Rauch - Rettung von Menschen und Tieren - wirksame Löscharbeiten 		Art. 14 BayBO
	Zugänge bzw. Zufahrten	<ul style="list-style-type: none"> - Zugänge, die mit öffentlicher Verkehrsfläche verbunden sind, zur Sicherung des 2. Rettungsweges über Anleiterung - Zufahrten, in direkter Verbindung mit öffentlicher Verkehrsfläche, zur Rettung über Hubrettungsfahrzeuge 		Art.5 (1) BayBO, Richtlinien über Flächen für die Feuerwehr
	Aufstell- und Bewegungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> - nicht überbaute, befestigte, auf dem Grundstück liegende, mit der öffentlichen Verkehrsfläche direkt oder mit Feuerwehrzufahrt in Verbindung stehende Fläche (vorrangig für Hubrettungsfahrzeuge) 		Art.5 (2) BayBO, Richtlinien über Flächen für die Feuerwehr
Abstandsflächen	<ul style="list-style-type: none"> 0,4 H; für Städte mit weniger als 250.000 Einwohner. Min. jedoch 3m Abstandsfläche 	<ul style="list-style-type: none"> - anrechenbare Gebäudehöhe Hauptgebäude= 12,20m, Treppenhaus =12,93m - resultierende Abstandsfläche: Hauptgebäude: 4,88m Treppenhaus: 5,17m 	Art.6 (5) BayBO	
Rettungswege				
Rettungswege	erster und zweiter Rettungsweg	<ul style="list-style-type: none"> - min. 2 von einander unabhängige Rettungswege ins Freie pro NE und Geschoss -1. Rettungsweg zu ebener Erde oder über notwendige Treppe -2. Rettungsweg über (eine weitere) notwendige Treppe oder Rettungsgerät der Feuerwehr 	<ul style="list-style-type: none"> - 1. Rettungsweg über notwendige Treppe -2. Rettungsweg über Hubrettungsfahrzeug 	Art. 31 BayBO
	Rettungswege horizontal/vertikal	<ul style="list-style-type: none"> - Weg zu notwendigem Flur, Treppenraum, ins Freie max. 35m von jeder Stelle eines Aufenthaltsraumes - Mindest-Fluchtwegbreite: 1 m bzw. 1,2m wenn Wendepunkt vorhanden (1,5x1,5) 	<ul style="list-style-type: none"> - längster Rettungsweg: 35 m - kleinste Fluchtwegbreite: 1 m 	Art. 33 (2) BayBO, Basics Brandschutz S.51, DIN 18040-2
	notwendige Treppen	<ul style="list-style-type: none"> -Mindestbreite im Lichten: 1 m ab Handlauf -Antritt nicht unmittelbar hinter einer Tür -min. ein Handlauf -Materialität unter "Brandverhalten von Bauteilen" 		Art.32 BayBO, DIN 18065 Kapitel 6
		<ul style="list-style-type: none"> barrierefrei: -gerade Läufe -Setzstufen 		

				Art.33 BayBO
notwendige Treppenträume	-eigener, durchgehender Treppenraum bis unter die Dachhaut - aufschlagende Türen dürfen Fluchtwegbreiten nicht reduzieren -Materialität unter "Brandverhalten von Bauteilen" -in jedem Stockwerk ein Fenster min 0,5m ² freier Querschnitt -Rauchableitung an oberster Stelle von min. 1m ² freiem Querschnitt und von unten und obersten Podest bedienbar			
Aufzüge	-keine abwärtsführenden Treppen vor Aufzugstüren (bzw. 3m Abstand davor) -vor Aufzugstüren Bewegungsfläche 1,5x1,5m -Türbreite im Lichten min. 90cm			
Brandabschnitte	Brandwände - innere Brandwände für ausgedehnte Gebäude mit einer Länge von mehr als 40m - äußere Brandwände als Abschlusswände, wenn Wände max. 2,5m zur Grundstücksgrenze und/oder das benachbarte Gebäude ist 5m entfernt		- innere Brandwände nicht erforderlich, da Gebäude 34,74 m lang - äußere Brandwände nicht erforderlich, da Wände zu Grundstücksgrenze und Nachbargebäude genügend weit entfernt sind	Art.28 (2) BayBO
Brandverhalten von Bauteilen und Baustoffen	tragende Wände, Stützen	R60+ Kz60 im Bereich von Doppelböden: auch auf Systemboden möglich, wenn gemeinsam kompatibel (min. gleiche Feuerwiderstandsklasse) und damit raumabschließende Wirkung	R 60+ Kz60 in Holz: - Konstruktion, Oberflächen: Brandschutzbekleidung beidseitig/allseitig (18mm aus A1/A2 Baustoffen), hohlraumfüllende Dämmung aus nichtbrennbarer Dämmung	Art. 25 BayBO, MSysB6R (2005), MHolzBauRL Kapitel 4.1
	Außenwände	- da alle AW tragend sind: wie "tragende Wände" - Außenwandbekleidung (Oberfläche, Dämmstoffe, Unterkonstruktionen): schwerentflammbar (B1) und nicht brennend abfallen/abtropfen bzw. normalentfallbar wenn Brandausbreitung auf andere Bauteile begrenzt ist	in Holz: - Konstruktion und Oberfläche innen: wie tragende Wände - Bekleidung/ Oberfläche außen: nicht brennbare Dämmstoffe, nicht brennbare Trägerplatte, Lüftungsspalt max. 5cm, horizontale Brandsperren je Geschoss, vertikale Verblockung an den Außenecken der Bekleidung	Art. 26 BayBO, MHolzBauRL Kapitel 6.2

Trennwände	EI 60+ Kz60, notwendig zwischen Nutzungseinheiten im Bereich von Doppelböden: auf Rohdecke stehend	EI 60+ Kz60 in Holz: Konstruktion, Oberflächen: Brandschutzbekleidung beidseitig/allseitig (18mm aus A1/A2 Baustoffen), hohlraumfüllende Dämmung aus nichtbrennbarer Dämmung	Art. 27 BayBO, MSysB6R (2005)
Decken (tragende, raumabschließend e)	R 60+ Kz60	R 60+ Kz60 in Holz: - Unterseite mit Brandschutzbekleidung - Oberseite auch oder Estrich in entsprechender Stärke	Art. 29 BayBO, MHolzBauRL Kapitel 4.4
Dach	harte Bedachung (widerstandsfähig bei Brandbeanspruchung von außen durch Flugfeuer und strahlende Wärme)	harte Bedachung in Holz: Unterseite mit Brandschutzbekleidung	Art. 30 BayBO
tragende Bauteile von notwendigen Treppen	nicht brennbare Baustoffe (A1 oder A2)		Art. 32 BayBO
Wände notwendiger Treppenträume (und Außen-treppenthaus)	Konstruktion: EI 60-M+ Kz60 Bekleidung, Putze, Dämmstoffe, Unterdecken, Einbauten: nicht brennbare Baustoffe bzw. nicht brennbare Bekleidung Bodenbeläge: min. schwerentflammbar	EI 60-M+ Kz60 in Holz: zulässig wie tragende Wände dh. nur mit Kapselkriterium und zusätzlich unter Berücksichtigung zusätzlich mechanischer Beanspruchung	Art. 33 BayBO, MSysB6R (2005), MHolzBauRL Kapitel 4.1
Türen	im Bereich von Doppelböden: auf Rohdecke stehend - in Trennwänden: feuerhemmend, dicht- und selbstschließend - (von notwendigem Treppenraum zu notwendigen Fluren: rauchdicht, selbstschließend) - von notwendigem Treppenraum zu NE: vollwandig, dicht- und selbstschließend		Art. 27, 33 BayBO
Fenster	- Fenster, die als Rettungswege gelten: min. 0,6m breit und 1 m hoch, max. 1,2m über Fußbodenoberkante generell gilt: in notwendigen Fluren müssen Systemböden immer aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und auch die Fugen mit nicht brennbaren Baustoffen verschlossen werden! außer: - Hohlböden (bis 20cm Hohlraum im Lichten) in notwendigen Treppenträumen/Fluren: min. 3cm Estrich, verlorene Schalung darf aus normalentflammbaren Baustoffen bestehen		Art. 35 BayBO
Doppelböden		Annahme für Entwurf: evtl. hinzukommende Lüftungskanäle max. Höhe =15cm	BayTB (2021) S. 145, MSysB6R (2005)

	Wände von Aufzügen	<ul style="list-style-type: none"> - wie raumabschließende Bauteile: EI 60+K260 - wenn aus brennbaren Baustoffen (A1/A2): schachtseitig Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen in ausreichender Dicke - Schächte: aus nicht brennbaren Baustoffen - innerhalb von Wohnungen zulässig - innerhalb von notwendigen Fluren und notwendigen Treppenhäuser nur wenn Maßnahmen getroffen sind damit Rettungsweg ausreichend lang nutzbar ist z.B. Brandschutzbekleidung - nur durch raumabschließende Bauteile führen wenn Vorkehrungen gegen Brandausbreitung getroffen sind Lüftungsleitungen: aus nichtbrennbaren Baustoffen, nur bedingt aus brennbaren Baustoffen; Durchdringung raumabschließender Bauteile nur wenn Vorkehrungen getroffen wurden z.B. Brandschutzklappen 	EI60+K260 in Holz: MHolzBauRL gilt nicht für Fahrschachtwände.	Art. 37 BayBO, MHolzBauRL Kapitel 1
technische Gebäudeausrüstung	Leitungsanlagen, Installations-schächte/-kanäle		in der Fallstudie nicht detailliert ausgeführt	Art.38 BayBO
	Lüftungsanlagen		in der Fallstudie nicht ausgeführt, aber Platz für Lüftungsanlage ist vorgesehen	Art.39 BayBO

Bauphysik

3. Anforderungen/Annahmen zur Umsetzbarkeit der Fallstudie

bezieht sich nur auf die Aufstockung

Hauptkategorie	Unterkategorien	geplantes SOLL	Abweichung/Umsetzung im Entwurf	Quelle der Annahme
Bauphysik				
winterlicher Wärmeschutz	Dämm-eigenschaften der Gebäudehülle	- U-Werte auf Passivhausniveau opake Bauteile zur Außenluft: $\leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Fenster inkl. Fensterrahmen (transluzente Bauteile): $\leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$		(Passivhaus Institut, 2021)
	Luftwechselrate n50 (Infiltration) =Luftdichtigkeit	n50: max. $0,6 \text{ h}^{-1}$		Caala-Software, (Passivhaus Institut, 2021)
	Wärmebrücken-zuschlag	$<0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ = Detail erfüllt Kriterium "wärmebrückenfreies Konstruieren"		(Passivhaus Institut, 2021)
sommerlicher Wärmeschutz		-passiv -Fensterflächenanteile nach Himmelsrichtung orientiert in % der jeweiligen Außenwandfläche: Süd max. 50% Ost und West unter 30%, Nord spielt untergeordnete Rolle --> nur qualitativer Nachweis, keine Berechnung zur Behaglichkeit, max. Innenraumtemperatur, Sonneneintragswert durchgeführt	- passiv über Fensterlüftung und Lüftungsanlage und außen-/innenliegenden Sonnenschutz -Fensterflächenanteile nach Himmelsrichtung: Süd und Nord: 17%, Ost 26% und West 20%	(Hegger et al., 2007, S. 97)
Feuchteschutz		- Schutz gegen Schlagregen (konstruktiv) - Schutz vor Tauwasser auf Bauteilen (Oberflächentemperatur und Raumlüftung) - Schutz vor Tauwasser in Konstruktionen --> nur qualitativer Nachweis, keine Tauwasserberechnung	Schimmelbildung wird vermieden über Standarddetails (Wärmedämmung, Dampfsperren), konstruktiven Holz- bzw. Bauteilschutz, regelmäßiges Stoßlüften durch Schulung der Nutzer	(Hegger et al., 2007, S. 97)
Licht	Tageslicht	- Mindestfensteröffnungen min. 1/8 der Netto-Grundfläche des Raums --> nur qualitativer Nachweis	siehe Entwurf	Art. 45 (2) BayBO

	künstliches Licht	in Räumen ohne ausreichendes Tageslicht bzw. Räumen ohne Fenster und in den Treppenräumen, notwendigen Fluren - innerhalb der NE individuell/ nutzerabhängig --> kein Nachweis	Art. 45 (3) BayBO, Art. 33 (7) BayBO
Schallschutz	Schutz gegen Lärm aus angrenzenden Räumen (Luft- und Trittschall)	- Wohnungstrennwände und zu Hausfluren: $R'w \geq 53$ dB - Wohnungstrenndecken: $R'w \geq 54$ dB, $L'n,w \leq 50$ dB bzw. ≤ 53 dB für Holzbau - Treppen $L'n,w \leq 53$ dB (wird nicht nachgewiesen) - Türen von Treppenraum in Flure der NE: $Rw \geq 27$ dB, Türen von Treppenraum in Aufenthaltsräume von NE: $Rw \geq 37$ dB - Schutz von gebäudetechnischen Anlagen (Norm-Schalldruckpegel) --> kein Nachweis bzw. nur über Bauteileigenschaften --> wird vernachlässigt, kein Nachweis	DIN 4109-1 Kapitel 5, Tabelle 2
	Schutz gegen Außenlärm (Luftschaall)	--> wird vernachlässigt, kein Nachweis	
	Schutz gegen Lärm von gebäudetechnischen Anlagen (Norm-Schalldruckpegel)	--> wird vernachlässigt, kein Nachweis	
Gebäudetechnik und Bedarfswerte	Heizwärmebedarf	Jahresheizwärmebedarf nach Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) = max. 15 kWh/(m ² a)	(Passivhaus Institut, 2021), DIN V18599
	Wärmeerzeugungsanlage	keine benötigt, nur für Warmwasser	Der maximale Bedarf für Heizwärme wird statt auf die Wohnfläche nach PHPP auf die nach DIN V18599 definierte und Energiebezugsfläche bezogen. Luft-Wasser-Wärmepumpe
	Kühlenergiebedarf	keine aktive Kühlung geplant	
	Lüftungsenergiebedarf		ermittelt mit Caala

	Energiebedarf (Heizung, W.wasser, Haushaltsstrom)	<p>-Maximaler Bedarf an erneuerbarer Primärenergie (PER) nach PHPP = max. 60 kWh/(m²a) (+/- 15kWh/(m²a))</p> <p>- Warmwasserbedarf (nach DIN 18599-10)</p> <p>- Annahme Nutzerstrombedarf nach DIN 18599-10, Tabelle 4</p> <p>-Betriebsstrom der Aufzugsanlage</p>	<p>- Auf der Grundlage von max. 15kWh/m²a Heizwärmebedarf, ist der Energiebedarf mit Caala berechnet (Energie für Raumwärme, Hilfsenergie)</p> <p>hinzu kommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Annahmen zur Energie für Warmwasserbereitung mit Caala (nach DIN 18599-10) - Annahmen zum Nutzerstrombedarf (TEK des BBSR) -Annahmen zum Betriebsstrom der Aufzugsanlage auf Grundlage QNG-Berechnung 	(QNG, 2022), (Passivhaus Institut, 2021); DIN 18599-10
--	--	--	---	---

Tragwerk

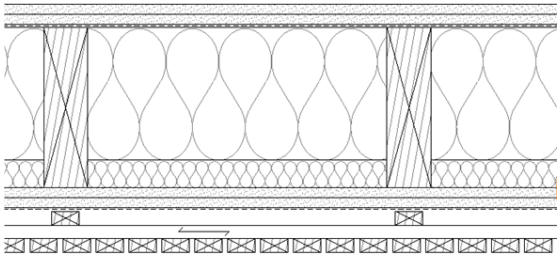

3. Anforderungen/Annahmen zur Umsetzbarkeit der Fallstudie

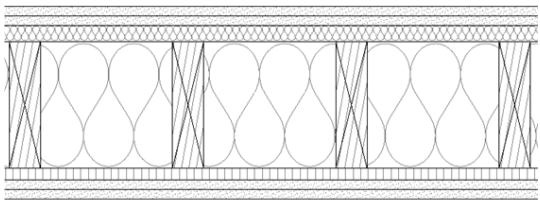

bezieht sich nur auf die Aufstockung

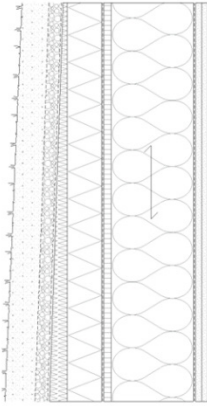

Hauptkategorie	Unterkategorien	geplantes SOLL	Abweichung/Umsetzung im Entwurf	Quelle der Annahme
Mechanische Festigkeit und Standsicherheit				
Tragsystem	Decke/ Dach	einachsig spannende, von Außenwand zu tragender Innenwand, die parallel zur langen Gebäuseite verläuft = Holzbalkendecke: Stabtragwerk		
	Wände	Holztafelbau: Kraftverbund von Beplankung und Ständerwerk, bestehend aus Schwelle, Ständer und Rähm		
Aussteifung		-über die Beplankung der Holztafelwände; nach Mehrgeschossigem Holzbau S.46 ausreichend, wenn nicht mehr als 7m Gebäudehöhe -weitere aussteifende Elemente: siehe Spalte "Umsetzung im Entwurf"	- tragende Holztafelelemente in Außenwand und im Treppenhaus - Betonwände der Aufzugsanlage -Betondach des neuen Treppenhauses	(Kaufmann, 2017, S. 46)
wirkende Lasten		- Eigenlast, geringe zu erwartende Last, da Holzbau - Verkehrslast, geringe zu erwartende Last, da Wohnnutzung - Windlast, geringe zu erwartende Last, da in Stadtgebiet und in Region mit geringen Windgeschwindigkeiten - Schneelast, hohe zu erwartende Last, da in Region mit hoher Schneeertrag		DIN EN 1991-1-4/NA:2010-13; DIN EN 1991 1-4
Dimensionen der tragenden Elemente der Bauteile	Außenwände	kein Nachweis, Werte aus Standardaufbau nach dataholz.eu	Ständerquerschnitt min. KVH 240/60 I variiert von Umsetzung	dataholz.eu, Außenwand awrhh04b
	tragende Innenwände	kein Nachweis, Werte aus Standardaufbau nach dataholz.eu	Ständerquerschnitt KVH 120/60	dataholz.eu, Außenwand iwrxxo10b
	Dach	kein Nachweis, Werte aus Standardaufbau nach dataholz.eu	Dach: Rippenquerschnitt KVH min 240/80	dataholz.eu, Flachdach fdroba01a
	Hohlraumboden	kein Nachweis, Werte aus Produktdatenblatt FLOOR and more, Fa. Lindner	Plattenstärke 40 mm (Calciumsulfatplatte)	(Fa. Lindner, 2020)

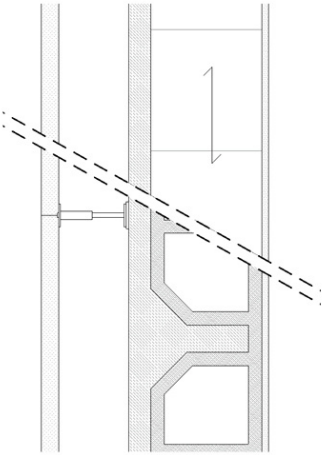

Annahmen aus dem Bestand	Tragfähigkeit Bestandswände	<p>- Außenwände UG: 40cm Stampfbeton - EG: 30cm Hohllochziegel - 1.+2.OG: 30cm Bimshohlblocksteine</p> <p>Steinfestigkeitsklasse des Bestandes vermutlich nach DIN 18151 bei 30cm Breite 2,45-5 N/mm². Vergleich Steinfestigkeitsklasse moderner Hohllochziegel bei 38cm Breite 11,5-14,2 N/mm²</p> <p>- das Dach aus Betonfertigelementen wird bei der Aufstockungsmaßnahme entsorgt. Das neue Dach, sowie die hinzukommenden Wände sind in leichter Holztafelbauweise geplant. Zusätzlich hinzukommende Lasten werden durch das wegfallende, schwere Betondach, somit teilweise ausgeglichen</p>	Steinfestigkeitsklasse weist auf mögliche Ertüchtigung der Außenwände im Bestand hin, nach Deutschlandstudie (Tichelmann et al., 2016, S.33) durchschnittlich jedoch 1,3 Geschosse baurechtlich und statisch umsetzbar <p>--> Annahme: Bestand kann zusätzliche Lasten der Aufstockung aufnehmen</p>	DIN 18151, (Gangoly et al., 2018, S. 23), (Tichelmann et al., 2016, S. 33)
Tragfähigkeit Bestandsdecken	Tragfähigkeit Bestandsdecken	<p>-Hohlkörperdecken im Remy-Decken-System, Deckenstärke vermutlich 25cm plus 5cm Aufbeton -angenommene Nutzlast bei der Dimensionierung der Bestandsdecken vermutlich 2.0 kN/m², heute wird nach DIN EN 1991-1-1 eine Nutzlast von 1,5 kN/m² angenommen</p>	<p>--> Annahme: oberste Geschossdecke muss nicht ertüchtigt werden. Es ist ein Hohlräumboden mit Fußbodenaufbau auf der obersten Geschossdecke geplant</p>	(Giebeler et al., 2008, S. 173–189); Quelle frühere Annahme Nutzlast, DIN EN 1991-1-1

Anhang C - Bauteilkatalog

BT N01 Aufstockung_Außenwand												
Nr. (von außen nach innen)	Baustoff	d [mm]	Gefach- anteil	λ [W/mK]	U-Wert [W/(m ² K)]	Brandverhaltens- klasse	Austausch [a]	Skizze Bauteilaufbau				
1.	Holz (Lärche) Verkleidung	25	0,08	0,155	0,13	D	40					
2.	Holz (Fichte) Lattung (25/50)	25	0,08	0,12		D	50					
3.	Holz (Fichte) Konterlattung (25/50)	25	0,08	0,12		D	50					
4.	Windbremse aka Unterspannbahn	0,2	1	0,33			50					
5.	Gipsfaserplatte (2x18mm) mit erhöhter Festigkeit: Doppelbeplankung	36	1	0,32		A2	60					
7.	Mineralwolle zw. Konstruktionsholz [$\geq 1000^\circ\text{C}$]	290	0,9	0,035		A1	50					
9.	Konstruktionsholz (80/290; e=625)	290	0,1	0,12		D	50					
11.	Dampfbremse	0,2	1	0,33			50					
12.	Gipsfaserplatte (2x18mm) mit erhöhter Festigkeit: Doppelbeplankung	36	1	0,32		A2	60					
Anforderungen		SOLL										
Wärmeschutz		U-Wert $\leq 0,15$ W/(m ² K)										
Brandschutz		R60+K-60: AW-Bekleidung B1 (C-s2,d0), B2 wenn keine Brandausbreitung										
Horizontalschnitt												

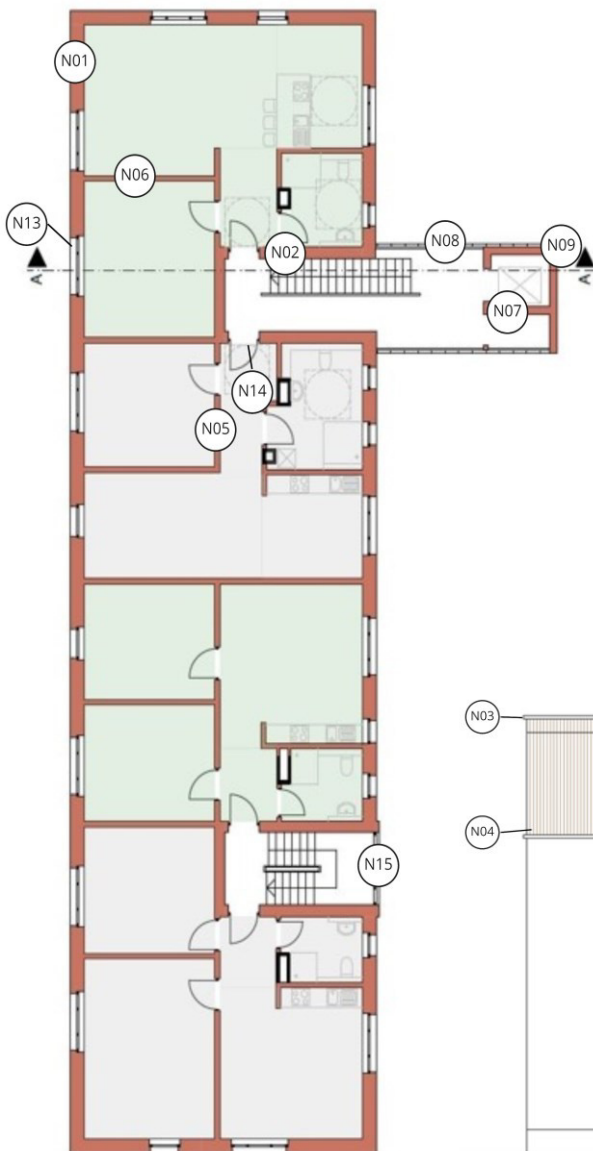
BT N02 Aufstockung_Treppenhausewand									
Nr. (von innen nach außen)	Baustoff	d [mm]	Gefachanteil	λ [W/mK]	U-Wert [W/(m²K)]	Brandverhaltensklasse	a [Jahren]	Skizze Bauteilaufbau	
1.	Gipsfaserplatte (2x18mm) mit erhöhter Festigkeit: Doppelbeplankung	36	1	0,32	0,186	A2	60		
2.	OSB-Platte	22	1	0,13		D	60		
3.	Konstruktionsholz (60/240; e=312,5)	240	0,19	0,12		D	50		
4.	Mineralfolle zw. Konstruktionsholz [≥1000°C]	240	0,81	0,035		A1	50		
5.	Federschienen aus Stahlblech (verzinkt)	8,25	0,026	50		-	50		
6.	Mineralfolle zw. Stahlschienen [≥1000°C]	30	0,97	0,035		A1	50		
8.	Gipsfaserplatte (2x18mm) mit erhöhter Festigkeit: Doppelbeplankung	36	1	0,32		A2	60		
Horizontalanschnitt									
Lage des Bauteils									
									
Anforderungen									
Wärmeschutz		U-Wert ≤ 0,15 W/(m²K)							
Brandschutz		REI60-W+K≥60							
Schallschutz		R'w ≥ 53 dB							

BT N03 Aufstockung_Dach										
Nr. (von innen nach außen)	Baustoff	d [mm]	Gefach- anteil	λ [W/mK]	U-Wert [W/(m²K)]	Brandverhaltens- klasse	a [Jahren]	Skizze Bauteilaufbau		
1.	extensive Begrünung	80	1	2	0,091	-	30			
2.	Trennschicht/ Wurzelschicht	3,5	1	0,4		-	50			
3.	Drainageschicht	30	1	2		-	50			
4.	Abdichtung EPDM Ethylen-Propylen-Dien- (Kautschuk)	1,5	1	0,25		-	30			
5.	Gefälledämmung Holzfaserdämmplatte	10	1	0,04		E	50			
6.	Aufdächdämmung Holzfaserdämmplatte	10	1	0,04		E	50			
7.	Notabdichtung EPDM Ethylen-Propylen-Dien- (Kautschuk)	1,5	1	0,25		-	30			
8.	OSB-Platte	22	1	0,13		D	60			
9.	Konstruktionsholz (80/240; e=800)	240	0,1	0,12		D	50			
10.	Mineralfolle zw. Konstruktionsholz [≥1000°C]	240	0,9	0,035		A1	50			
11.	Dampfbremse	0,2	1	0,33			50			
6.	Gipsfaserplatte (2x18mm) mit erhöhter Festigkeit: Doppelbeplankung	36	1	0,32	A2	60				
Anforderungen										
Wärmeschutz			SOLL							
Brandschutz			U-Wert ≤ 0,15 W/(m²K)							
			harte Bedachung							
Vertikalschnitt										
										

BT N04 Aufstockung_Boden auf Bestand											
Nr. (von innen nach außen)	Baustoff	d [mm]	Gefachanteil	λ [W/mK]	U-Wert [W/(m²K)]	Brandverhaltensklasse	a [Jahren]	Skizze Bauteilaufbau			
1.	Estrich (Zement/Anhydrit/Calciumsulfat)	40	1	1,2		A2	50				
5.	Punktständer Stahl verzinkt** (60x60cm Raster) Höhe 15cm	0,00004	1	50		-	50				
8.	Beton Aufbeton*	50	1	-	-	A1	-				
9.	Stahlbeton* Ausguss Remydecke (60/220)	220	0,06	-	-	A1	-				
10.	Hohlkörperdecke* (Remydecke)	250	0,94	-	-	A1	-				
Vertikalschnitt gegen die Tragrichtung/in Tragrichtung											
*Bestand, wird in Ökobilanz nicht betrachtet											
**vernachlässigt, da Dicke zu gering für Caala											
Anforderungen											
SOLL											
Wärmeschutz	keine Anforderung										
Brandschutz	aus nicht brennbaren Baustoffen										
Schallschutz	R _w ≥ 54 dB, L _{n,w} ≤ 53 dB										
					Lage des Bauteils						
											

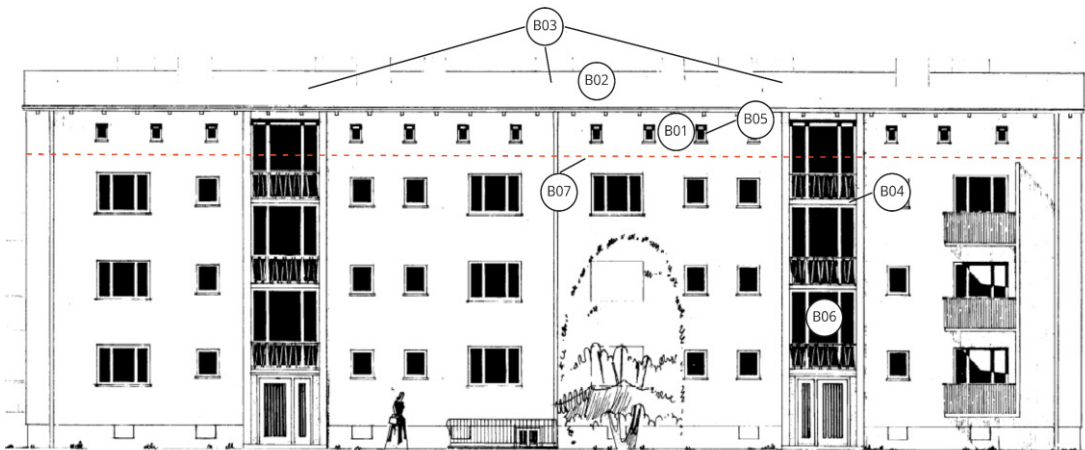
Nr. (von innen nach außen)	Baustoff	d [mm]	Gefach- anteil	λ [W/mK]	a [Jahren]
BT N05 Aufstockung_Innenwand tragend/Wohnungstrennwand					
CAALA_B02a					
1.	Gipskartonfaserplatte (2x) je 18mm	36	1	0,32	60
2.	OSB-Platte	22	1	0,13	60
3.	Konstruktionsvollholz (e=625mm)	120/60	0,1	0,12	50
4.	Mineralwolledämmung zwischen Konstruktion [$\geq 1000^\circ\text{C}$]	120	0,9	0,035	50
5.	OSB-Platte	22	1	0,13	60
6.	Gipskartonfaserplatte (2x) je 18mm	36	1	0,32	60
BT N06 Aufstockung_Innenwand nicht tragend					
CAALA_B03					
2.	Gipskartonfaserplatte (2x) je 18mm	36	1	0,32	60
3.	Konstruktionsvollholz (e=625mm)	80/60	0,1	0,12	50
4.	Mineralwolledämmung zwischen Konstruktion [$\geq 1000^\circ\text{C}$]	80	0,9	0,035	50
5.	Gipskartonfaserplatte (2x) je 18mm	36	1	0,32	60
BT N07/09 Treppenhaus_Betonwand Treppe Nord					
CAALA_B04a					
1.	Stahlbeton	250	1	2,1	50
BT N08 Treppenhaus_Stahlseilkonstruktion Treppe Nord					
CAALA_B04b					
1.	Edelstahlseil, bzw. Edelstahl	3	0,015	50	80
BT N10 Treppenhaus_Dach Treppe Nord					
CAALA_B07a					
1.	Kies	50	1	2	50
2.	Abdichtung, EPDM (Ethylen-Propylen-Dien- Kautschuk)	1,5	1	0,25	30
3.	Stahlbeton	200	1	2,1	50
BT N11 Treppenhaus_Geschossdecke Nord					
CAALA_B01b					
1.	Natursteinplatten auf Metallständer	50	1	-	50
2.	Nebenträger HEB (200/200) e=100	200	0,078	50	50
3.	Hauptträger UPE (200/80) (4Stk.)	200	0,019	50	50

BT N13 Aufstockung_Fenster				CAALA_A12	
1.	3-fach Verglasung, Holz-Alu U-Wert: W/(m²K); g-Wert:			U=0,8 W/(m²K), 1 g=0,6	40
BT N14 Aufstockung_Wohnungseingangstür				CAALA_A14	
1.	Holztür (vollwandig, dicht- und selbstschließend)	-		U=0,8 W/(m²K)	40
BT N15 Aufstockung_Fenster				CAALA_B12c	
1.	3-fach Verglasung, Holz-Alu U-Wert: W/(m²K); g-Wert:	-		U= 1,3 W/(m²K)	40



Nr. (von innen nach außen)	Baustoff	d [mm]	Gefach- anteil	λ [W/mK]	a [Jahren]	
BT B01 Dachgeschoss Bestand_ Außenwand						CAALA_A02
1.	Gipsfaserplatten der Flankendär	18*	1	0,32	60	
2.	Flankendämmung, Styropor	100*	1	0,035	50	
3.	Bimshohlblocksteine	250	1	0,45	100	
4.	mineral. Putz	20	1	0,4	45	
BT B02 Dachgeschoss Bestand_ Dach						CAALA_A03a
1.	Dachpappe bzw. doppelagige Bitumenlage je 5mm	10	1	0,23	20	
2.	Bimsbetonplatten, armiert	150*	1	0,45	100	
3.	Betonfertigteilebalken, Spannbeton	250/80*	0,08	2,1	50	
BT B03 Dachgeschoss Bestand_ Innenwände tragend						CAALA_B02
1.	Ziegelmauerwerk, Hochlochziegel (Hlz 100)	240	1	0,36	50	
BT B04 Dachgeschoss Bestand_ Treppe						CAALA_B01
1.	Massiver Kunststein bzw. Betonwerkstein	250*	1	2,1	50	
BT B05 Dachgeschoss Bestand_ Fenster						CAALA_A12a
1.	1-fach Verglasung, Holzrahmen (U-Wert: W/(m ² K); g-Wert:)	-	1	U= 1,3 W/(m ² K)	40	

1.	2-fach Verglasung, Holzrahmen (U-Wert: W/(m²K); g-Wert:) wenn verfügbar ohne 3-fach Verglasung Pfosten-Riegel annehmen	-	1	U= 1,3 W/(m²K)	40
BT B07 Dachgeschoss Bestand_Decke-Aufbau					CAALA_A11
1.	Zementestrich*	35	1	1,4	50
2	Trittschalldämmung*	10	1	0,035	50
*geschätzt					



Anhang D - Architekturpläne

1x Lageplan 1:500,

2x Grundrisse 1:100,

1x Schnitt 1:100,

3x Ansichten 1:100,

1x Fassadenschnitt 1:20

2x Details 1:5



Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

Verfasserin Elena Maria Kühner
Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

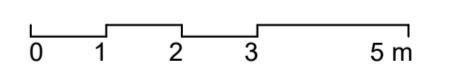
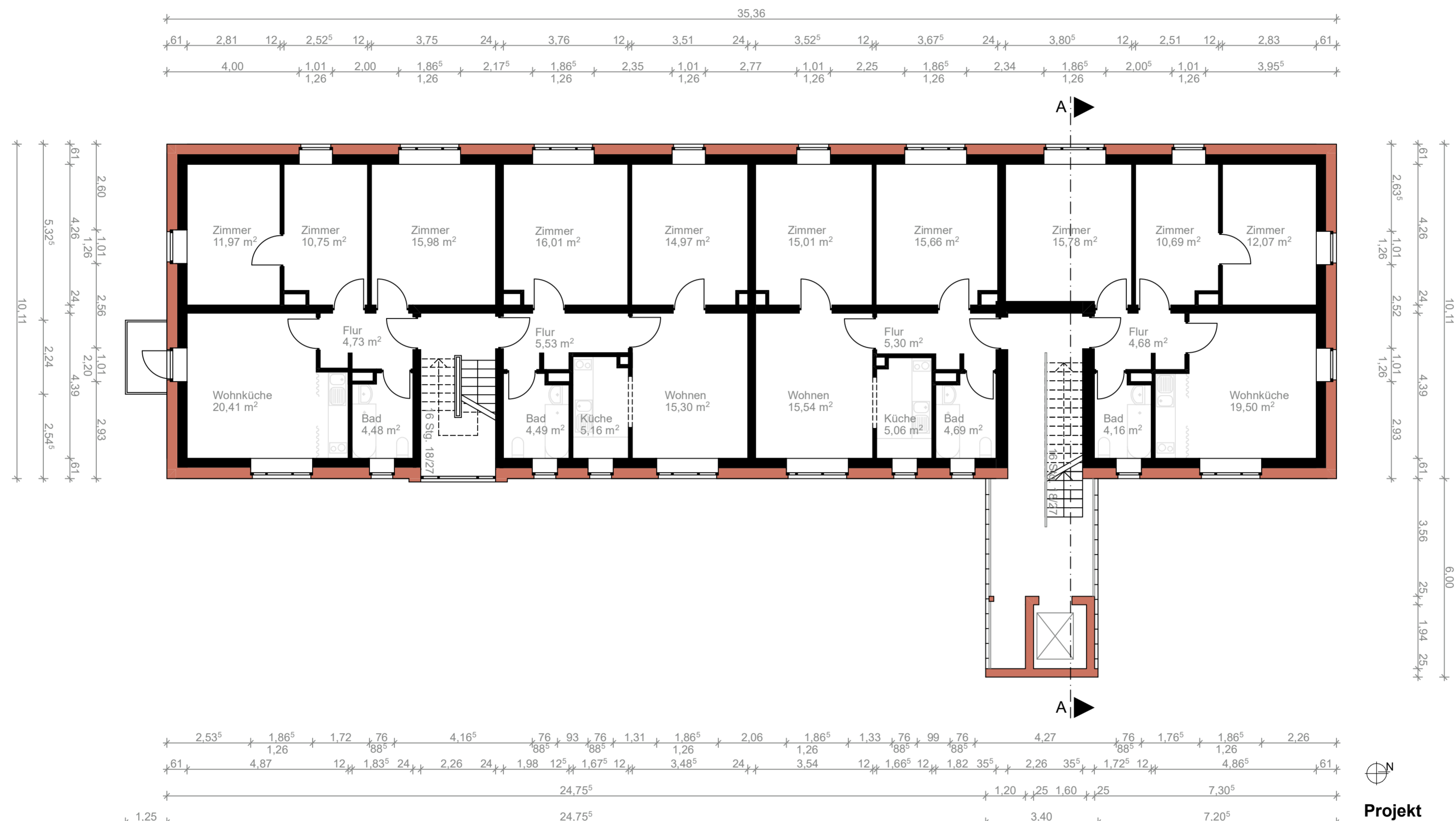
Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Lageplan

Maßstab 1:500

Datum 07.07.2022





Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

Verfasserin Elena Maria Kühner

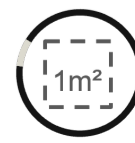
Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

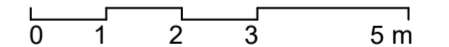
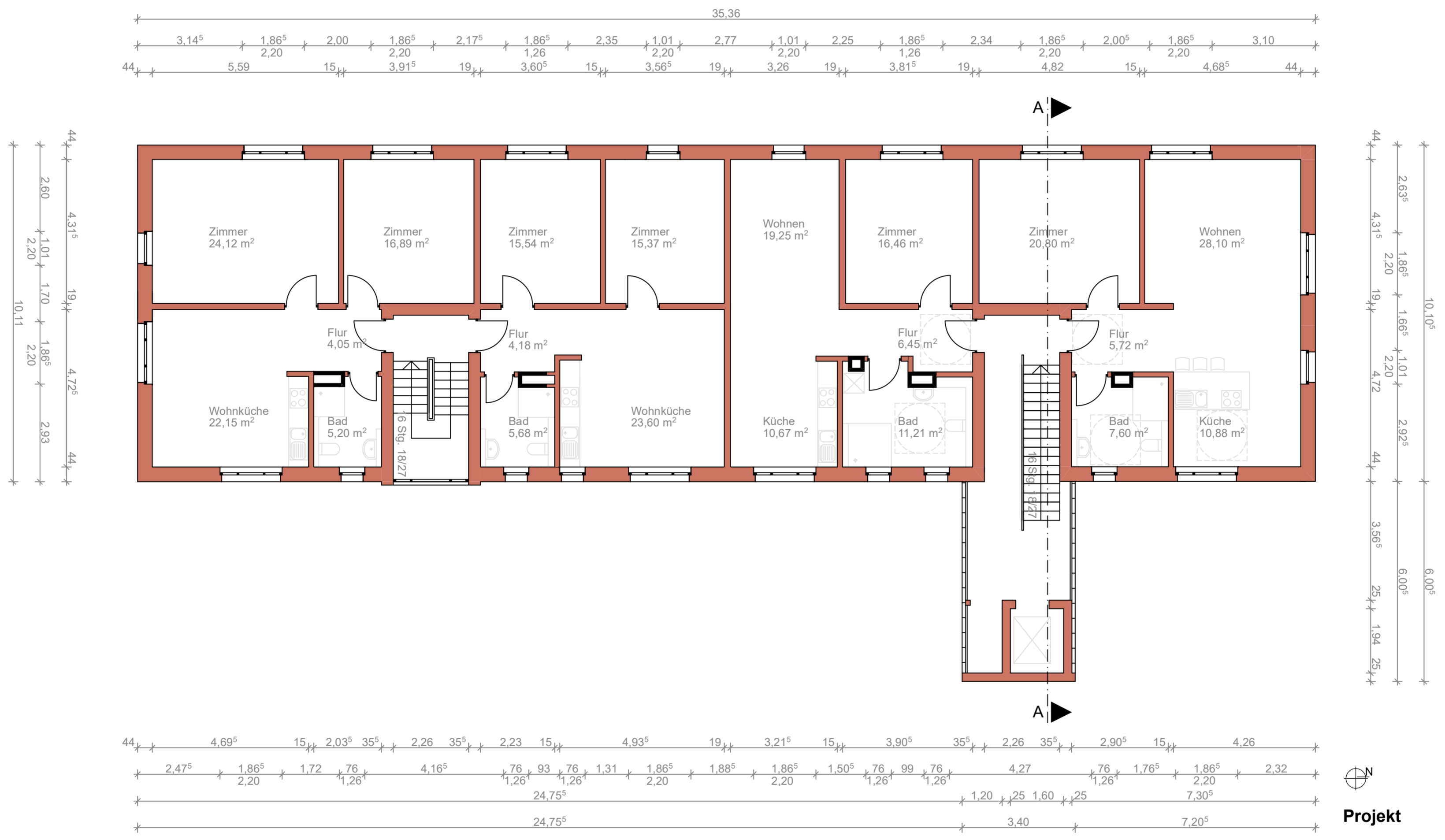
Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Grundriss 2. Obergeschoss

Maßstab 1:100

Datum 07.07.2022





Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

Verfasserin Elena Maria Kühner

Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

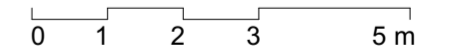
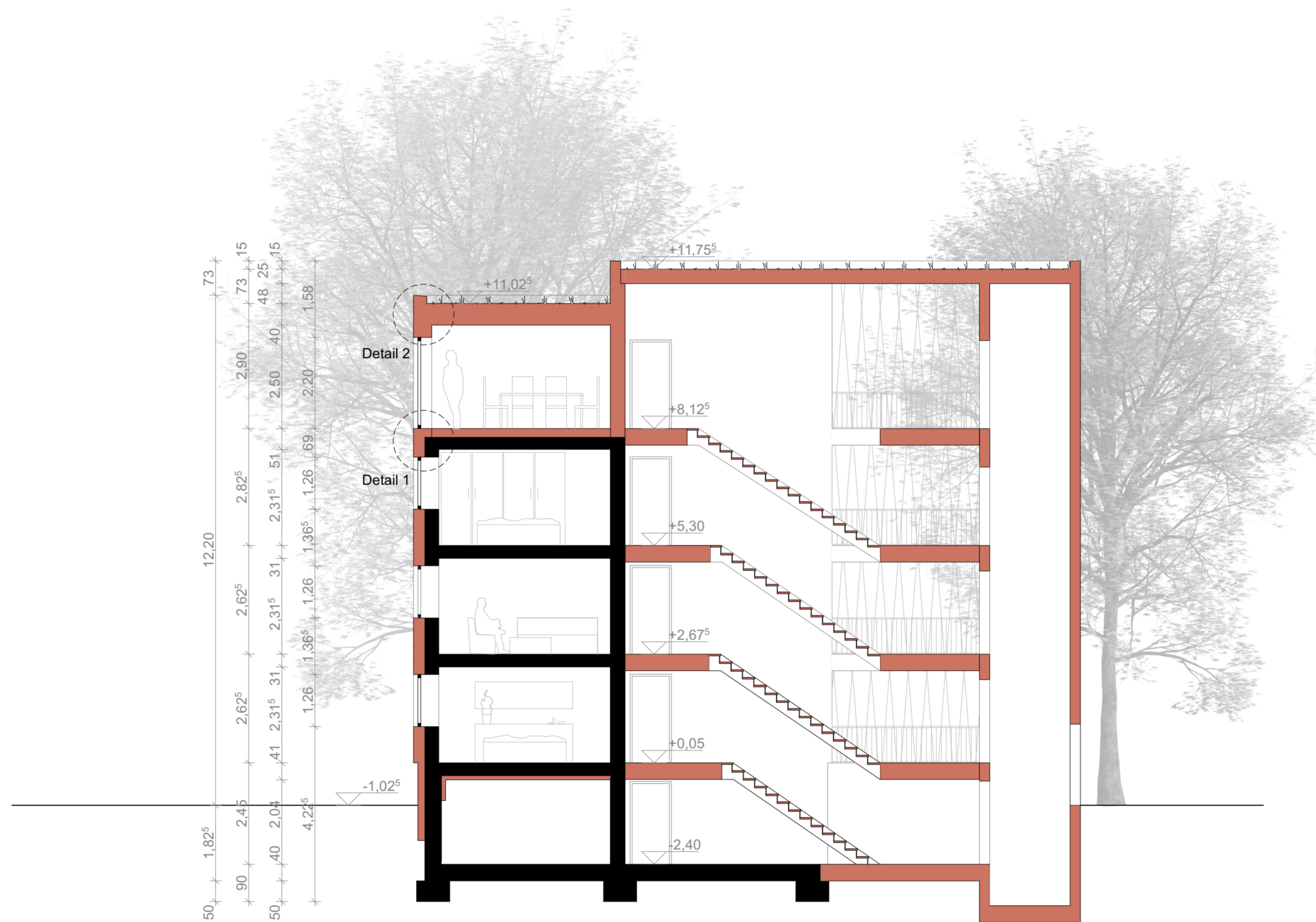
Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Grundriss 3. Obergeschoss

Maßstab 1:100

Datum 07.07.2022





Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

Verfasserin Elena Maria Kühner
 Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Schnitt A-A

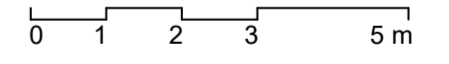
Maßstab 1:100

Datum 07.07.2022





Ostansicht



Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

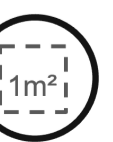
Verfasserin Elena Maria Kühner
Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Ostansicht

Maßstab 1:100

Datum 07.07.2022

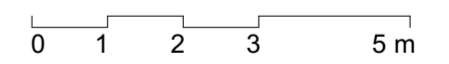




Südansicht



Nordansicht



Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

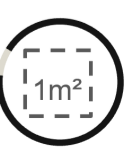
Verfasserin Elena Maria Kühner
 Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Süd- und Nordansicht

Maßstab 1:100

Datum 07.07.2022





Westansicht

0 1 2 3 5 m

Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

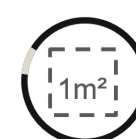
Verfasserin Elena Maria Kühner
Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

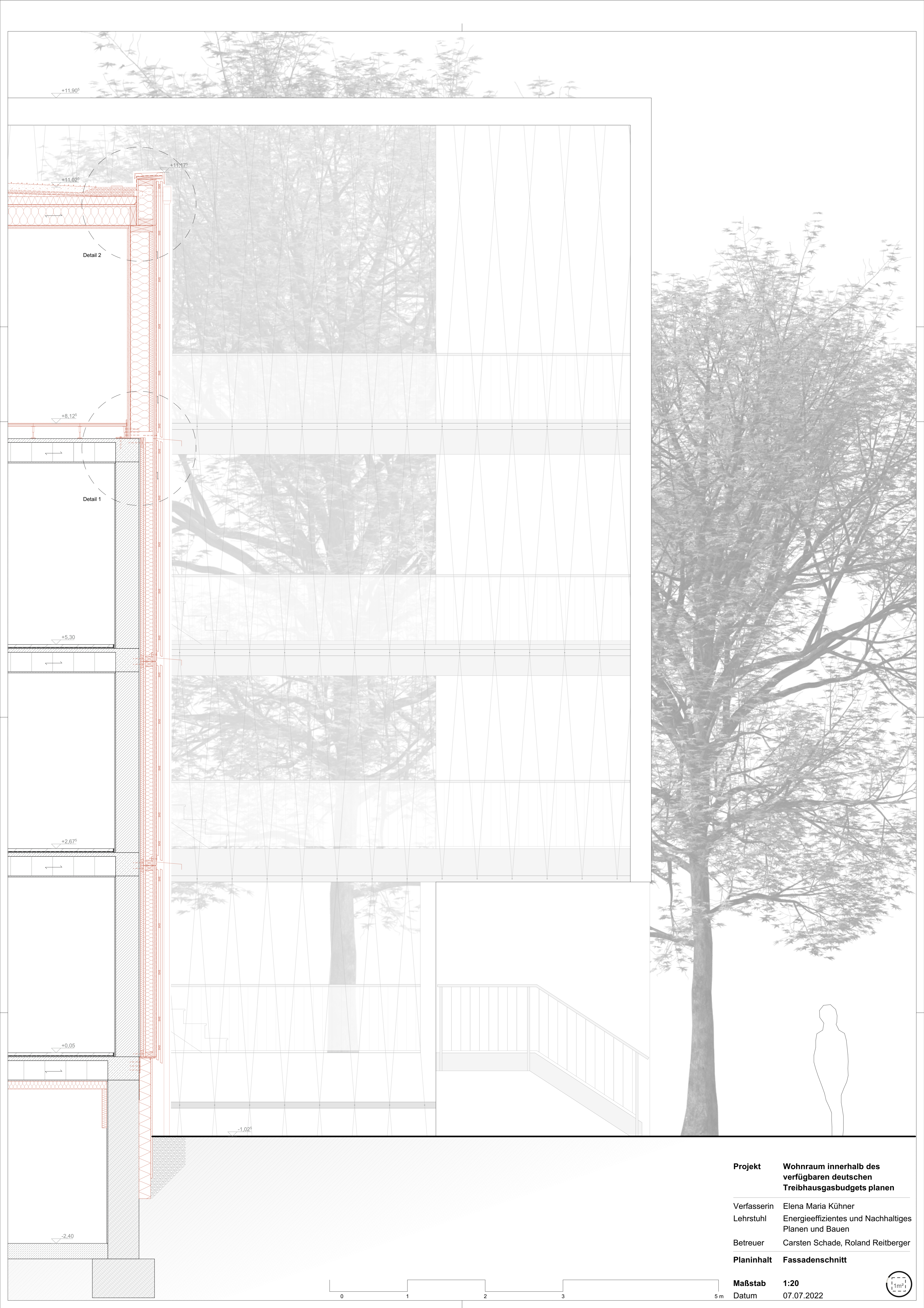
Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Westansicht

Maßstab 1:100

Datum 07.07.2022





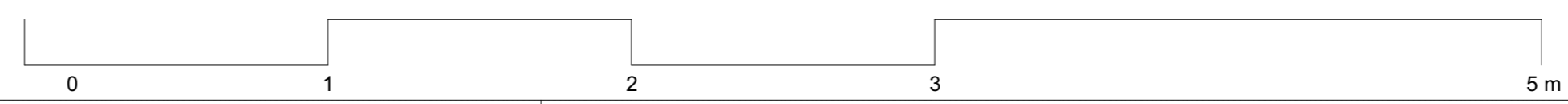
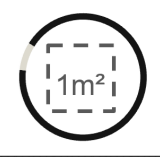
Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

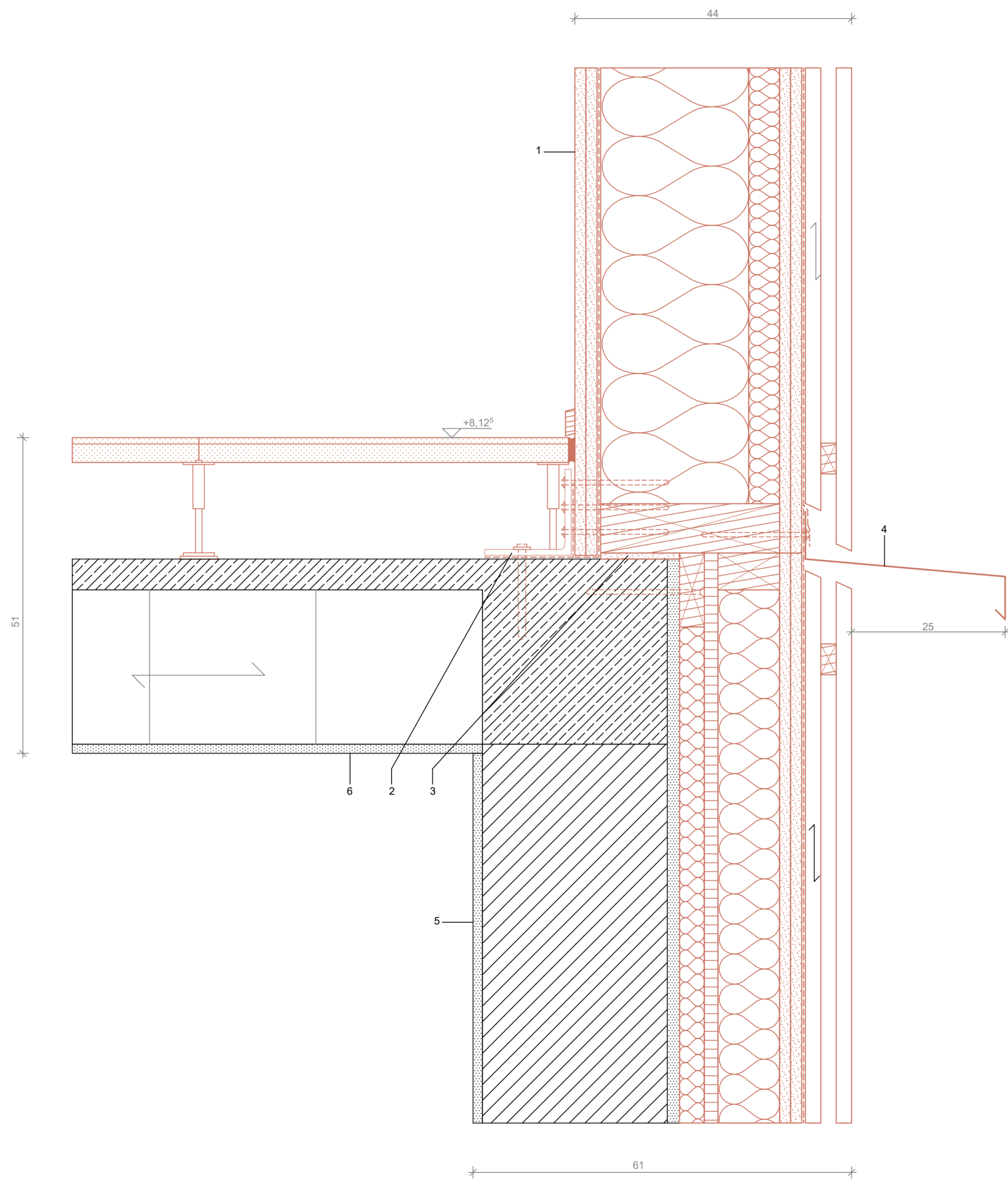
Verfasserin Elena Maria Kühner
Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

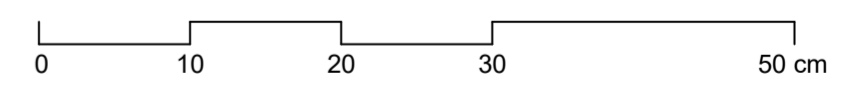
Planinhalt Fassadenschnitt

Maßstab 1:20
Datum 07.07.2022





- 1 Lärchenschalung vertikal 25/50
Lattung und Konterlattung KVH je 25/50
Windbremse (zweite, wasserführende Schicht)
Gipsfaserplatte 2x18mm, Brandschutzbekleidung
Mineralwolle zwischen KVH 80/290, Tragwerksebene und Dämmschicht
Dampfbremse (luftdichte Ebene)
Gipsfaserplatte 2x18mm, Brandschutzbekleidung
- 2 Winkelstahl 140/140 10 mm, Lagesicherung der Fassade
- 3 Quellmörtel zum Ausgleich von Ungenauigkeiten
- 4 Brandbarriere, bei Hinterlüftung und vertikaler Schalung
- 5 Lärchenschalung vertikal 25/50
Lattung und Konterlattung KVH je 25/50
Windbremse (zweite, wasserführende Schicht)
Gipsfaserplatte 2x18mm, Brandschutzbekleidung
Mineralwolle zwischen KVH 80/100, Tragwerksebene und Dämmschicht
OSB-Platte 22mm
Mineralwolle zwischen KVH-Lattung 40mm, Ausgleichsschicht
Bestand:
mineralischer Putz
Bimshohlblokksteine 300mm
mineralischer Innenputz
- 6 Trockenhohlraumboden mit Parkettbelag
Punktständer Stahl verzinkt mit Schallentkopplung
Bestand:
Aufbeton 50mm
Hohlkörperdecke 250mm, Verguss mit Stahlbeton Remydecke



Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

Verfasserin Elena Maria Kühner
Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

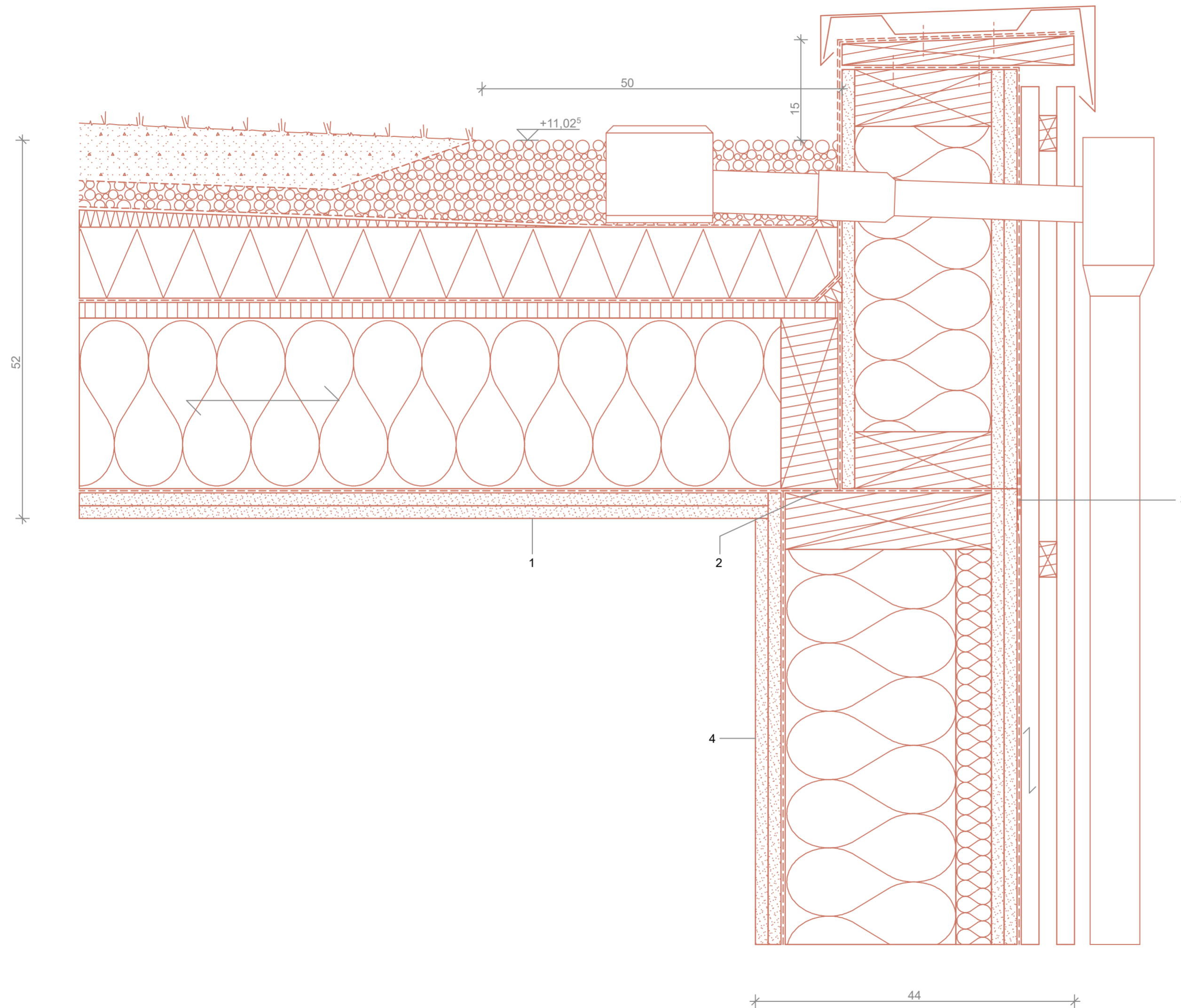
Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Detail 1 Anschluss an Bestandsdecke

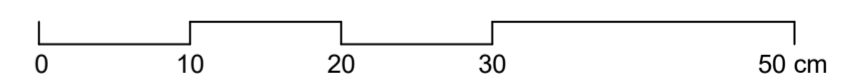
Maßstab 1:5

Datum 07.07.2022





- 1 Substrat mit extensiver Bepflanzung 80mm
Trennschicht/Wurzelschicht
Drainageschicht 30mm
EPDM-Folie (wurzelfest) mit unterseitiger Vlieskaschierung, Abdichtung
Holzfaserdämmplatte 0-150mm, Gefälledämmung
Holzfaserdämmplatte 100mm, Aufdämmung
EPDM-Folie, Notabdichtung
OSB-Platte 22mm
Mineralwolle zwischen KVH 80/240, Tragwerksebene und Dämmschicht
Dampfbremse (luftdichte Ebene)
Gipsfaserplatte 2x18mm, Brandschutzbekleidung
- 2 Stoß der luftdichten Schichten,
durch Überlappung der luftdichten Schicht beider Bauteile
- 3 Verklebung Winddichtigkeitsbahn am Elementstoß
- 4 Lärchenschalung vertikal 25/50
Lattung und Konterlattung KVH je 25/50
Windbremse (zweite, wasserführende Schicht)
Gipsfaserplatte 2x18mm, Brandschutzbekleidung
Mineralwolle zwischen KVH 80/290, Tragwerksebene und Dämmschicht
Dampfbremse (luftdichte Ebene)
Gipsfaserplatte 2x18mm, Brandschutzbekleidung



Projekt Wohnraum innerhalb des verfügbaren deutschen Treibhausgasbudgets planen

Verfasserin Elena Maria Kühner
Lehrstuhl Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen

Betreuer Carsten Schade, Roland Reitberger

Planinhalt Detail 2 Dach

Maßstab 1:5
Datum 07.07.2022



Anhang E – Ökobilanzierung

Digitaler Anhang

Anhang F - Gegenüberstellung

Direkter Vergleich von THG-Budget und THG-Bedarf für Wohngebäude

	Betriebs- emissionen	Graue Emissionen	Einheit	Quelle
THG Budget [kgCO ₂ eq/m ² a]	19,21	1.000,41	[kg CO ₂ eq/m ² (NGF) _a mittel]	eigene Excel "CO ₂ -Budgets", Sheet: "Budget je m ² a bis 2029"
THG Bedarf [kgCO ₂ eq/m ² a]	18,12	7	[kg CO ₂ eq/m ² (NGF) _a mittel]	eigene Excel "Ökobilanz gesamt", Sheet: "Übersicht"
THG-Bedarf [kgCO ₂ /m ²]		350,07	[kg CO ₂ eq/m ² (NGF) _a mittel]	eigene Excel "Ökobilanz gesamt", Sheet: "Übersicht"
THG Bedarf pro m ²		350,07	[kg CO ₂ eq/m ² (NGF)]	eigene Excel "Ökobilanz gesamt", Sheet: "Übersicht"

Vergleich von THG-Budget und THG-Bedarf für Wohngebäude

THG-Budget ab 2021

Quelle: eigene Excel "CO₂-Budgets", Sheet: "Budget "Betrieb"&Herst.+Err"

	GESAMT Betriebs-Emissionen	pro Jahr über 8 Jahre Betriebs- Emissionen	GESAMT Graue Emissionen	pro Jahr über 8 Jahre Graue Emissionen
[Mt CO ₂ eq]	600,91	75,11	236,66	29,58
[t CO ₂ eq]	600.909.200,00	75.113.650,00	236.660.000,00	29.582.500,00
[kg CO ₂ eq]	600.909.200.000	75.113.650.000	236.660.000.000	29.582.500.000

weitere Annahmen

Quelle: eigene Excel "CO2-Budgets", Sheet: "Budget kgCO2eq pro m²&a"

Wohnflächenbedarf pro Jahr		Einheit	Quelle
Mittelfristiger Wohnungsbedarf in DE durchschnittliche NGF pro Whg.	400.000	Stk. Whg./a	(Tichelmann et al., 2016, S. 59)
	73,93	m²(NGF)/Whg.	(Destatis, 2021c, S. 263–264)
Bedarf an NGF pro Jahr	29.570.828	m²(NGF)/a	
Bedarf an NGF ab 2021 bis 2029 (innerhalb der nächsten 8 J.)	236.566.624	m²(NGF)	
Bedarf an NGF ab 2021 bis 2045 (innerhalb d. nächsten 24 J.)	709.699.872	m²(NGF)	
Bedarf an NGF ab 2021 bis 2100 (innerhalb d.nächsten 79 J.)	2.336.095.412	m²(NGF)	
Wohnfläche Bestand			
NGF vorhanden am 1.1.2021	3.816.372.112	m²(NGF)	eigene Excel: "CO2-Budgets" Sheet "Budget je m²a bis 2029" basierend auf(Destatis, 2021d)
Zeit bis Ressourcen aufgebraucht (wenn lineare Abnahme der Gesamtemissionen)			
	8,00	Jahre	eigene Berechnungen in Excel "CO2-Budgets", Sheet: "THG-Budgetkurven je Ziel"
neue Wohnfläche vorhanden im Jahr...(Ende)			
2021	29.570.828	m²(NGF)	
2022	59.141.656	m²(NGF)	
2023	88.712.484	m²(NGF)	
2024	118.283.312	m²(NGF)	
2025	147.854.140	m²(NGF)	
2026	177.424.968	m²(NGF)	
2027	206.995.796	m²(NGF)	
2028	236.566.624	m²(NGF)	
kumulierte Menge an m²(NGF) neuer Wohnungen =zu beheizende Wohnfläche neuer Wohnungen in NGF bis 2029	1.064.549.808	m²(NGF)	

Anhang F - Gegenüberstellung

CO2-Bedarf ab 2021- Graue Emissionen

Bedarf an Grauen Emissionen		Einheit	Rechenweg
THG-Bedarf für eine Wohnung	25.879,65	kg CO2eq	∅ Wohnfläche je Whg. x Graue Emissionen pro m²
THG-Bedarf pro Jahr für alle neuen Wohnungen in DE (bei 400000 Whg/a)	10.351.859.757,96	kg CO2eq/a	Wohnungsbedarf DE x CO2-Bedarf für eine Woh.
THG-Bedarf für alle neuen Wohnungen in DE innerhalb von 8 Jahren (bis 2029)	82.814.878.063,68	kg CO2eq	CO2-Bedarf je Jahr x 8 Jahre
THG-Bedarf für alle neuen Wohnungen in DE innerhalb von 24 Jahren (bis 2045)	248.444.634.191,04	kg CO2eq	CO2-Bedarf je Jahr x 24 Jahre
THG-Bedarf für alle neuen Wohnungen in DE innerhalb von 79 Jahren (bis 2100)	817.796.920.878,84	kg CO2eq	CO2-Bedarf je Jahr x 79 Jahre

Vergleich		
THG-Bedarf bis 2029 (8 J.)	82.814.878.064	kg CO2eq
THG-Bedarf bis 2045 (24 J.)	248.444.634.191	kg CO2eq
THG-Bedarf bis 2100 (79 J.)	817.796.920.879	kg CO2eq
THG-Budget gesamt Graue Emissionen	236.660.000.000	kg CO2eq

THG-Bedarf ab 2021- Betriebsemissionen

Bedarf an Betriebsemissionen	Einheit	Rechenweg
THG-Bedarf für den Betrieb einer Wohnung/Jahr	1339,56 kg CO ₂ eq/a	∅ Wohnfläche je Whg x Betriebsemissionen pro Jahr und m ²
THG-Bedarf für neue Wohnungen pro Jahr	535823403,4 kg CO ₂ eq/a	Wohnungsbedarf pro Jahr in DE x CO ₂ -Bedarf pro Wohnung und Jahr
THG-Bedarf für alle Bestandswohnungen pro Jahr	2,50527E+11 kgCO ₂ eq/a	Wohnfläche in 2021 x CO ₂ -Bedarf pro m ² und Jahr für Bestandswohnungen
THG-Bedarf für alle neuen Wohnungen innerhalb von 8 Jahren (nur Neubau)	19.289.642.521 kgCO ₂ eq	zu beheizende neue Wohnfläche bis 2029 x CO ₂ -Bedarf pro Wohnung und Jahr
THG-Bedarf für alle Bestandswohnungen innerhalb von 8 Jahren (nur Bestand)	2.004.217.159.463 kgCO ₂ eq	CO ₂ -Bedarf für Bestandswohnungen pro Jahr x 8 Jahre
THG-Bedarf für alle Wohnungen innerhalb von 8 Jahren	2,02E+12 kgCO ₂ eq	
Kontrolle	2,02E+12 kgCO ₂ eq	
THG-Bedarf für alle neuen Wohnungen innerhalb von 24 Jahren (nur Neubau)	174.142.606.092 kgCO ₂ eq	
THG-Bedarf für alle Bestandswohnungen innerhalb von 24 Jahren (nur Bestand)	6.012.651.478.388 kgCO ₂ eq	
THG-Wohnungen innerhalb von 24 Jahren	6,19E+12 kgCO ₂ eq	
THG-Bedarf für alle neuen Wohnungen innerhalb von 79 Jahren (nur Neubau)	1.736.067.826.886 kgCO ₂ eq	
THG-Bedarf für alle Bestandswohnungen innerhalb von 79 Jahren (nur Bestand)	19.791.644.449.695 kgCO ₂ eq	
THG-Bedarf für alle Wohnungen innerhalb von 79 Jahren	2,15E+13 kgCO ₂ eq	

Vergleich	
THG-Bedarf bis 2029 (8 J.)	2.023.506.801.984 kg CO2eq
THG-Bedarf bis 2045 (45 J.)	6.186.794.084.480 kg CO2eq
THG-Bedarf bis 2100 (79 J.)	21.527.712.276.581 kg CO2eq
THG-Budget gesamt	
Betriebsemissionen	600.909.200.000 kg CO2eq

CO2-Bedarf für alle neuen Wohnungen innerhalb von 3 Jahren (nur Neubau)	3.214.940.420	kgCO2eq
CO2-Bedarf für alle Bestandswohnungen innerhalb von 3 Jahren (nur Bestand)	751.581.434.799	kgCO2eq
CO2-Bedarf für alle Wohnungen innerhalb von 3 Jahren	754.796.375.219	kgCO2eq

CO2-Bedarf für alle neuen Wohnungen innerhalb von 2 Jahren (nur Neubau)	535.823.403	kgCO2eq
CO2-Bedarf für alle Bestandswohnungen innerhalb von 2 Jahren (nur Bestand)	501.054.289.866	kgCO2eq
CO2-Bedarf für alle Wohnungen innerhalb von 2 Jahren	501.590.113.269	kgCO2eq

Schnittpunktberechnung		Rechenweg
Unterschied CO2-Bedarf innerhalb von 2 Jahren oder innerhalb von 3 Jahren	253.206.261.950 kgCO2eq	
Gleichung 1, f(x)=	600.909.200.000	
Gleichung 2, f(x)=	253.206.261.950 x	
Ende des Budgets in Jahren	2,373 Jahre	https://rechneronline.de/gerade/schnittpunkt.php

Emissionen für den Betrieb von Wohngebäuden im Bestand in Deutschland

		Einheit	Quelle
CO ₂ -Emissionen pro Jahr 2019	218.752.000	t CO ₂ /a	(Destatis, 2021b)
	218.752.000.000	kg CO ₂ /a	
THG-Emissionen pro Jahr 2019	248.582.713.306	kg CO ₂ eq/a	(Destatis, 2021e) eigene Excel: "CO ₂ - Budgets" Sheet "Budget je m ² a bis 2029"
Wohnfläche vorhanden Ende 2019	3.908.300.000	m ²	
Faktor zur Umrechnung der Wohnfläche in NGF	0,9689		
NGF vorhanden Ende 2019	3.786.751.870	m ² NGF	
--> durchschnittliche THG-Emissionen im Jahr für den Betrieb des Bestandes			
pro m ² Wohnfläche	64	kg CO ₂ eq/m ² a	
pro m ² NGF	66	kg CO ₂ eq/m ² (NGF)a	

Übersetzung CO₂ in CO₂eq

(Umrechnung äquivalent wie Umrechnung in Tabelle "CO₂-Budgets")

Gas	Anteil an Gesamt in [%]	Emissionen 2019 [kg Gas]
CO ₂	88,00	218.752.000.000
CH ₄	6,13	15.245.064.994
N ₂ O	4,14	10.285.973.528
HFCs (F-Gase)	1,24	3.091.178.598
PFCs (F-Gase)	0,03	83.983.679
SF ₆ (F-Gas)	0,45	1.121.037.320
NF ₃ (F-Gas)	0,00	3.475.187
GESAMT		248.582.713.306