

Sanieren oder Neubau?

Eine Frage der Nachhaltigkeit

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Bachelor of Science

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

Betreut von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang und M.Sc. Markus Kleeberger
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von Florian Bachmaier
Watzling 5a
84405 Dorfen
+49 176 / 84388225

Eingereicht am München, den 08.12.2022

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

Herrn Florian Bachmaier, Watzling 5, 84405 Dorfen

– nachfolgend Autorin/Autor –

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

Sanieren oder Neubau? Eine Frage der Nachhaltigkeit

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

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

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

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

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

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

Vergütungen werden nicht gewährt.

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

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

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

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

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

München, den _____, den _____

.....

(TUM)

(Autor:in)

Erklärung

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

Ort, Datum, Unterschrift

Abstract

The aim of this work is to compare renovations and various new buildings in terms of environmental sustainability. In addition, it is to be found out whether renovations contribute to the achievement of the climate targets in Germany and whether current subsidy programs are helpful for this. For this purpose, a real existing building from 1942 was taken, which was to be renovated. Three building variants were developed for the comparison. A renovation variant, a new brick building and a new solid wood building, whereby the new building variants were to be located on undeveloped areas. The buildings are identical in terms of component areas, orientation and cubature.

The energy planning of the three variants was carried out by means of a GEG verification in each case. In the process, the building component structures and also the systems engineering are planned. In addition, a thermal bridge allowance is required for each variant for the GEG verification. This was calculated using a detailed thermal bridge analysis. The result of the energy planning are three KfW55-EH. These are approximately the same in terms of transmission heat loss and primary energy demand. Thus, a comparability was established regarding the building component structures.

The differences between the planned buildings lie on the one hand in the existing and new building materials, and on the other hand in the selected wall structures. This includes, for example, the foundations and the floor slabs. The gable roof, the windows, heating and ventilation system were designed identically.

A life cycle assessment was then prepared for each building variant. Particular attention was paid to the impact indicators greenhouse potential (GWP) and total non-renewable primary energy demand (PENRT). The aim of the LCA was to investigate the environmental sustainability of the materials used. The LCAs were performed using the online balancing tool eLCA, with Ökobaudat (ÖKOBAUDAT 2021_II_A1) serving as the database. Only modules A1-A3, B4, C3-C4 were considered.

The results of the LCA were first compared across different impact categories. The renovation variant achieved consistently better results and thus lower environmental impacts.

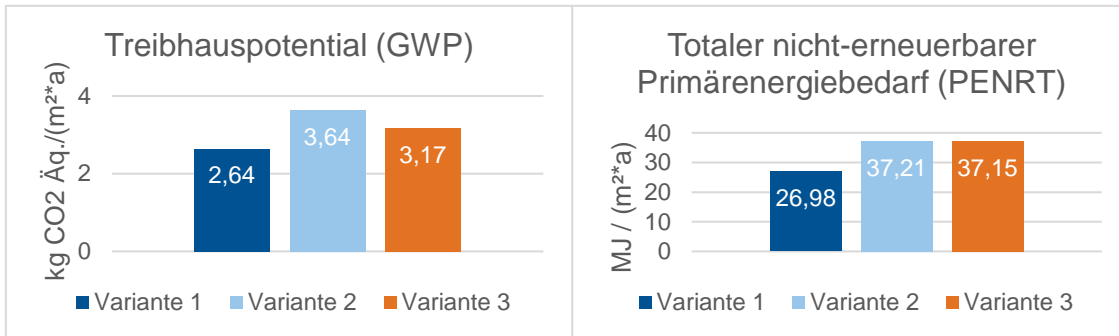


Abbildung 1: Graphical representation of the absolute values for GWP (own representation)

Abbildung 2: Graphical representation of the absolute values for the PENRT (own representation)

The impact categories GWP and PENRT were then examined in more detail. To investigate the origin of the differences in more detail, the variants were then compared according to component groups. It became apparent that the floor slab has the highest specific emissions and thus the largest contribution to the GWP. Again, the lowest emissions across all building components are found for the renovation. This is mainly due to the continued use of existing materials such as exterior and interior bricks. The solid wood variant follows afterwards by the credits for the biogenic new building materials.

Furthermore, the PENRT was examined in more detail. Unlike the GWP indicator, it is not the floor slab that has the highest area-specific environmental impact, but the roof structure. This has by far the highest area-specific demand for PENRT. Across all building components, the renovation variant has the lowest environmental impact. This is again mainly due to the continued use of existing materials.

The findings of the study show that the renovation option is the most sensible option compared to the new construction option for all aspects of environmental sustainability. This is due to the consumption of resources and resource efficiency on the one hand, and on the other hand to the issue of land use.

As a further conclusion of the work, it can be stated that buildings must be considered across all components and thus also materials to improve life cycle assessments and thus keep the environmental impact as low as possible. This is the only way to plan ecologically sustainable buildings in the future.

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich zwischen Sanierungen und verschiedenen Neubaugebäuden hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit. Außerdem soll herausgefunden werden, ob Sanierungen zur Erreichung der Klimaziele in Deutschland beitragen und ob aktuelle Förderprogramme hilfreich dafür sind. Dafür wurde ein reales Bestandsgebäude aus dem Jahre 1942 genommen, das saniert werden sollte. Daraus wurden drei Gebäudevarianten für den Vergleich entwickelt. Eine Sanierungsvariante (Variante 1), ein Ziegel-Neubau (Variante 2) und ein Holzmassiv-Neubau (Variante 3), wobei die Neubauvarianten auf unbebauten Flächen stehen sollen. Die Gebäude sind hinsichtlich der Bauteilflächen, der Ausrichtung und Kubatur identisch.

Die energetische Planung der drei Varianten erfolgte über jeweils einen GEG-Nachweis. Dabei werden die Bauteilaufbauten und auch die Anlagentechnik geplant. Zusätzlich wird für den GEG-Nachweis ein Wärmebrückenzuschlag pro Variante benötigt. Dieser wurde über einen detaillierten Wärmebrückennachweis berechnet. Ergebnis der energetischen Planung sind drei KfW55-EH. Diese sind annähernd gleich bezüglich Transmissionswärmeverlust und Primärenergiebedarf. Somit wurde eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der Bauteilaufbauten hergestellt.

Die Unterschiede der geplanten Gebäude liegen zum einen in den Bestands- und Neubaumaterialien, zum anderen in den gewählten Wandaufbauten. Dies beinhaltet beispielsweise die Fundamente, die Bodenplatte und die Geschossdecken. Das Satteldach, die Geschossfenster und die Anlagentechnik wurden identisch ausgeführt.

Anschließend wurde pro Gebäudevariante eine Ökobilanz erstellt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Wirkungsindikatoren Treibhauspotential (GWP) und dem totalen nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf (PENRT) gelegt. Ziel der Ökobilanzierung war es die ökologische Nachhaltigkeit der verwendeten Materialien zu untersuchen. Die Ökobilanzen wurden mit dem Online-Bilanzierungstool eLCA durchgeführt, wobei die Ökobaudat (ÖKOBAUDAT 2021_II_A1) als Datenbank diente. Dabei wurden nur die Module A1-A3, B4, C3-C4 betrachtet.

Die Ergebnisse der Ökobilanz wurden zunächst über verschiedene Wirkungskategorien verglichen. Dabei erzielte die Sanierungsvariante durchgehend bessere Ergebnisse und damit geringere Umweltwirkungen.

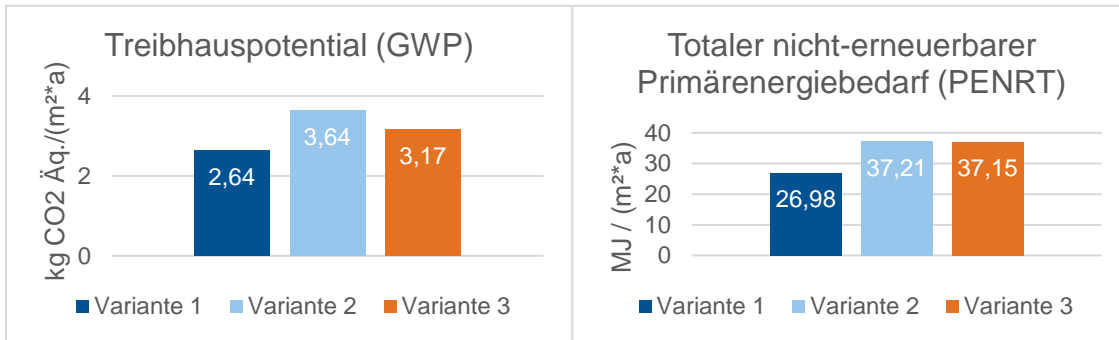


Abbildung 3: Graphische Darstellung der absoluten Werte für das GWP (eigene Darstellung)

Abbildung 4: Graphische Darstellung der absoluten Werte für das PENRT (eigene Darstellung)

Anschließend wurden die Wirkungskategorien GWP und PENRT genauer beleuchtet. Um den Ursprung der Unterschiede genauer zu untersuchen wurden die Varianten nach Bauteilgruppen verglichen. Dabei wurde ersichtlich, dass die Bodenplatte insgesamt die höchsten spezifischen Emissionen besitzt und damit den größten Beitrag zum GWP hat. Wieder ergeben sich die geringsten Emissionen über alle Bauteile hinweg für die Sanierung. Dies entspringt vor allem durch die weiterverwendeten Bestandsmaterialien, wie beispielsweise den Außen- und Innenziegeln. Die Holzmassivvariante folgt danach durch die Gutschriften für die biogenen Neubaumaterialien.

Des Weiteren wurde das PENRT näher beleuchtet. Anders als beim GWP-Indikator ist nicht die Bodenplatte, das Bauteil, mit den höchsten flächenspezifischen Umweltwirkungen, sondern die Dachkonstruktion. Diese hat mit Abstand den höchsten flächenspezifischen Bedarf an PENRT. Über alle Bauteile gesehen, besitzt wiederum die Sanierungsvariante die geringsten Umweltwirkungen. Dies liegt erneut an den weiterverwendeten Bestandsmaterialien.

Die Erkenntnisse der Arbeit zeigen über alle betrachteten Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit, dass die Sanierungsvariante die sinnvollste Variante im Vergleich zum Neubau ist. Dies liegt zum einen am Ressourcenverbrauch und der Ressourceneffizienz, zum anderen am Punkt der Flächeninanspruchnahme.

Als weitere Schlussfolgerung der Arbeit lässt sich ermitteln, dass Gebäude über alle Bauteile und damit auch Materialien betrachtet werden müssen, um Ökobilanzen zu verbessern und damit die Umweltwirkungen zu begrenzen. Nur so können in Zukunft ökologisch nachhaltige Gebäude geplant werden.

Abkürzungsverzeichnis

AP	Acidification Potential (=Versauerungspotential)
Äq.	Äquivalent
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BGF	Brutto-Grundfläche
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
Bzw.	beziehungsweise
DG	Dachgeschoss
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung
eLCA	Online-Ökobilanzierungstool für Gebäude
EG	Erdgeschoss
EP	Eutrophication Potential (=Überdüngungspotential)
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GWP	Global Warming Potential (=Treibhauspotential)
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LCA	(=Life Cycle Assessment) Ökobilanz/ Lebenszyklusanalyse

NaWoh	Nachhaltiger Wohnungsbau
NGF	Netto-Grundfläche
ODP	Ozone Depletion Potential (=Ozonschichtabbaupotential)
OG	Obergeschoss
ÖKOBAUDAT	Ökobilanz-Datenbank für Baustoffe
PENRT	Primary Energy Non-Renewable total (= totaler nicht-erneuerbarer Anteil der Primärenergie)
PERT	Primary Energy Renewable total (=erneuerbarer Anteil der Primärenergie)
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (=Ozonbildungspotential)
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
WDVS	Wärmedämm-Verbundsystem
WRG	Wärmerückgewinnung
z.B.	zum Beispiel

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	3
Erklärung	5
Abstract	7
Zusammenfassung	9
Abkürzungsverzeichnis	11
1. Einleitung.....	15
1.1. Ausgangssituation und Problemstellung	15
1.2. Forschungsfragen und Zielsetzung	18
1.3. Aufbau und Methodik.....	19
2. Grundlagen.....	21
2.1. Grundlagen von nachhaltigen Bauen.....	21
2.1.1. Aspekte der Nachhaltigkeit	21
2.1.2. Ökologische Nachhaltigkeit beim Bauen.....	23
2.1.3. Lebenszyklusbetrachtung	24
2.1.4. Bewertung der Nachhaltigkeit	25
2.2. Bewertung und Vergleich von Gebäuden.....	26
2.2.1. GEG-Nachweis.....	26
2.2.2. U-Wert.....	27
2.2.3. Wärmebrücken	27
2.2.4. Transmissionswärmeverlust	30
2.2.5. Jahres-Primärenergiebedarf	31
2.2.6. KfW 55 Effizienzhaus.....	32
2.3. Ökobilanz	33
3. Fallstudie: Energetische Planung und Ökobilanzierung eines Einfamilienhauses aus 1942.....	37
3.1. Bauliche und energetische Bestandserfassung	37
3.2. Energetische Maßnahmenplanung	43
3.2.1. Variante 1: Sanierung zum KfW 55 Effizienzhaus.....	44
3.2.2. Variante 2: Neubau Ziegelhaus zum KfW 55 Effizienzhaus	52
3.2.3. Variante 3: Neubau Holzmassivhaus zum KfW 55 Effizienzhaus.....	57
3.3. Vergleich der Varianten	62

3.3.1.	Maßnahmen an der Gebäudehülle und Anlagentechnik.....	62
3.3.2.	Vergleich ausgewählter Wärmebrücken.....	64
3.4.	Ökobilanz.....	67
3.4.1.	Systemabgrenzung.....	67
3.4.2.	Sachbilanz.....	69
3.4.3.	Wirkungsabschätzung.....	70
3.4.4.	Funktionelle Einheit.....	70
3.4.5.	Auswertung.....	70
3.4.6.	Ergebnisse Ökobilanz der drei Gebäudevarianten.....	71
4.	Förderung der KfW.....	83
5.	Schlussfolgerungen.....	85
6.	Ausblick und Empfehlungen.....	91
	Literaturverzeichnis.....	93
	Abbildungsverzeichnis.....	95
	Tabellenverzeichnis.....	97
	Anhangverzeichnis.....	99

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation und Problemstellung

Klimaschutz in Deutschland

Ein Grundstein hin zu mehr Klimaschutz wurde 2016 in Paris gelegt. 195 Staaten ratifizierten das „Paris Agreement“, mit dem Ziel die Erderwärmung auf maximal 2°C zu begrenzen, angepeilt werden jedoch eher 1,5°C. Das Abkommen wurde anschließend auf Bundesgesetze übertragen und ist im Klimaschutzgesetz aus 2019 niedergeschrieben. Darin sind der Zeitraum und die Menge der Treibhausgasemissionen festgelegt, die in Deutschland eingespart werden sollen. Genauer gesagt sollen die Emissionen gegenüber 1990 bis 2020 um über 35 Prozent bzw. bis 2030 um 65 Prozent gesenkt werden. Bis zum Jahr 2045 sollen zudem die Treibhausgasemissionen bis zur Netto-Treibhausgasneutralität gemindert werden. (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2019)

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) stellte dazu eine Studie zum Rest-CO₂ Budget des Bundes vor: *„Für einen fairen, angemessenen deutschen Beitrag zu den internationalen Klimazielen verbleibt aktuell noch ein maximales CO₂-Budget von 6,1 Gt CO₂, um die Erhitzung der Erde auf 1,75 Grad zu begrenzen (mit 67 % Wahrscheinlichkeit). Für das 1,5-Grad-Ziel (50 % Wahrscheinlichkeit) müsste Deutschland seine Emissionen auf maximal 3,1 Gt CO₂ begrenzen. Mit „maximal“ meint der SRU ein Budget, das gerade noch als kompatibel mit dem Paris-Abkommen gelten kann. Würden die Emissionen von jetzt an linear auf null reduziert, müsste Deutschland demnach bereits 2040 (1,75 °C) bzw. 2031 (1,5 °C) CO₂-neutral sein“* (Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU], 2022).

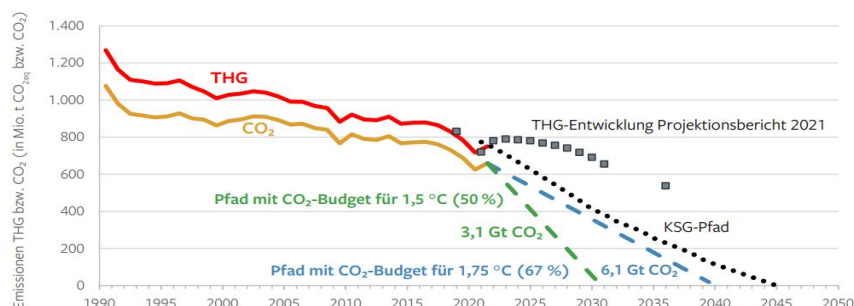


Abbildung 5: Vergleich bisheriger Treibhausgas- und CO₂-Emissionen, THG-Pfade gemäß KSG und Projektionsbericht sowie CO₂-Budget nach SRU-Berechnung (Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU], 2022a, S.23)

Wie an Abbildung 5, vom SRU, zu erkennen ist, sind einschneidende Maßnahmen notwendig, um die Ziele der Bundesregierung im vorgegebenen Zeitintervall zu erreichen. Diese erstrecken sich über alle Sektoren wie Verkehr, Industrie oder auch Gewerbe und die Privaten Haushalte. Gemeinsam haben fast alle Sektoren die Benutzung von Gebäuden. Im Folgenden wird sich deshalb näher mit der Rolle von Gebäuden im Klimaschutz auseinandergesetzt.

Die Rolle der Gebäude beim Klimaschutz

Auf Gebäude lassen sich etwa 40 Prozent der Treibhausgasemissionen Deutschlands zurückführen (vgl. Abbildung 6). Diese Zahl beinhaltet einerseits die Errichtung der Gebäude, andererseits den Betrieb. Nach Abbildung 6 werden dem Betrieb 13 Prozent der Emissionen und der Errichtung 27 Prozent zugeordnet. (Becker et al., 2022). Bedeutet, dass die Errichtung von Gebäuden denselben hohen Stellenwert wie die Betriebsphase einnimmt.

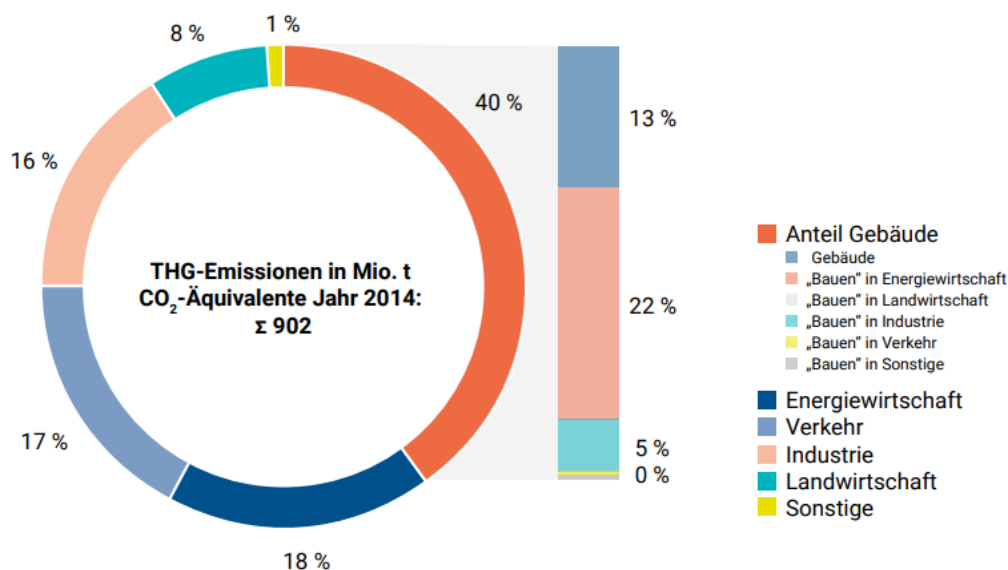


Abbildung 6: Treibhausgasemissionen für alle Sektoren und für die Errichtung und den Betrieb von Hochbauten nach Verursacherprinzip (Becker et al., 2022, S.55)

Interessant ist die in Abbildung 7 aufgeführte Verteilung des Wohngebäudebestandes gruppiert nach Baualter in Deutschland. Man erkennt, dass Gebäude der Baujahre 1949-1978 den mit Abstand größten Anteil am Gesamtbestand besitzen. Neuere Gebäude, vor allem nach 2003 gebaut, fallen weniger ins Gewicht. Beim Vergleich dieser Erkenntnis mit der Abbildung 8 wird klar, dass die Gebäude mit dem größten Anteil die höchsten flächenspezifischen Verbräuche besitzen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein gewaltiges Einsparpotential in der energetischen Bestandssanierung liegt.

Heute erreichen viele der Gebäudebauteile das Ende ihrer Lebensdauer. Dazu können beispielsweise Anlagentechnik, Bodenaufbauten oder auch Dämmsysteme zählen. Außerdem haben sich über die letzten Jahrzehnte, die Energiestandards und auch die Anforderungen an Komfort und Gebäudeausstattung oft erheblich verändert. Darüber hinaus können in zunehmendem Maß Ermüdungserscheinungen am Tragwerk auftreten. Deshalb gewinnt die Sanierung von Bestandsgebäuden immer mehr an Bedeutung.

Klar ist, dass Sanierungsobjekte die gleichen Energiestandards erfüllen können wie Neubaugebäude. Das bedeutet, dass sie in der Betriebsphase bei gleichen Wärmeverlusten und gleicher Anlagentechnik dieselbe Menge Energie benötigen und somit die gleiche Menge Treibhausemissionen erzeugen.

Unklar ist, ob Sanierungen über den gesamten Lebensweg, jedoch ohne die Nutzungsphase (vgl. Kapitel 2.3.), ökologisch nachhaltiger sind als Neubaugebäude. Dabei ist es interessant, wie Bestandsmaterialien und neue Baustoffe das Ergebnis beeinflussen. Dieser Frage soll in dieser Arbeit nachgegangen werden.

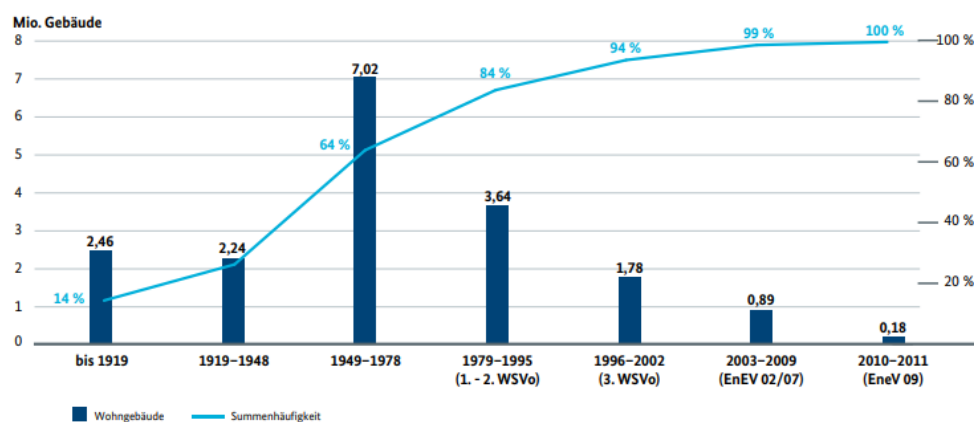


Abbildung 7: Verteilung des Wohngebäudebestands gruppiert nach Baualter (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2014, S. 5)

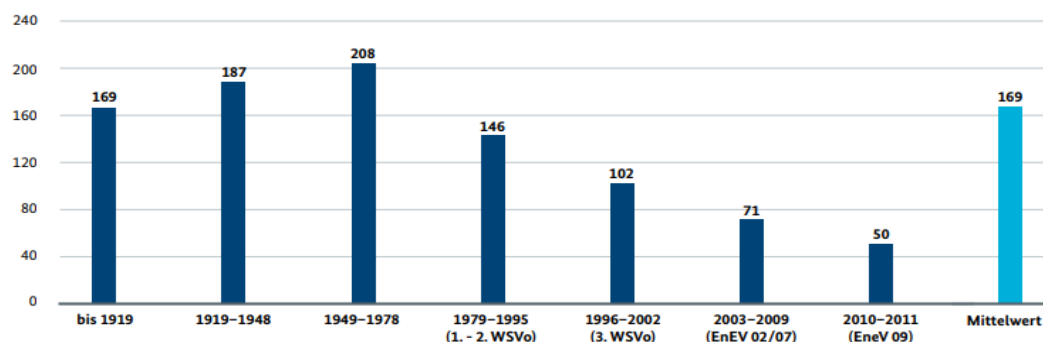


Abbildung 8: Verteilung des flächenbezogenen Endenergieverbrauchs des Gebäudebestands nach Baujahren in kWh/m²a (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2014, S. 7)

1.2. Forschungsfragen und Zielsetzung

Mit dem Hintergrund der aktuellen Klimakrise und Nachhaltigkeitsbewegung ist das Ziel dieser Arbeit, durch Beantwortung der nachfolgenden Forschungsfragen, zu einer Einordnung von Sanierungs- bzw. Neubauvorhaben in den Umweltdiskurs beizutragen. Zudem sollen für die Neuauflage der KfW-Förderprogramme 2023 Verbesserungsvorschläge geliefert werden. Es ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. Sollen Gebäude im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit saniert oder neu gebaut werden?
2. Tragen sanierte Gebäude zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung bei und sind aktuelle Förderprogramme förderlich dafür?

Das bedeutet, ein Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich der ökologischen Qualität von Sanierungsobjekten und Neubauten mit Hilfe von GEG-Nachweisen und Gebäudeökobilanzen. Als Ausgangssituation wird ein Bestandsobjekt und ein Neubau auf einem freien Baugrundstück betrachtet. Dabei soll besonderes Augenmerk auf den Unterschied gelegt werden, der durch die Verwendung von Bestands- und Neubaumaterialien entsteht. Außerdem soll der Einfluss von Sanierungsgebäuden auf die politischen Ziele des Klimaschutz in Deutschland dargestellt werden. Dabei sollen nur die Bauteile und somit nur die verwendeten Materialien beleuchtet werden. Die Nutzungs- bzw. Betriebsphase wird dafür außer Acht gelassen.

1.3. Aufbau und Methodik

Zunächst sollen in Kapitel 2 die Grundlagen zur Themenfrage erklärt werden, die für die Beantwortung der Forschungsfragen unabdingbar sind.

In Kapitel 3 wird anschließend mit einem Fallbeispiel fortgefahren, welches als Datengrundlage zur Beantwortung der Fragestellung dient. Dieses setzt sich aus den drei Gebäudevarianten: „Sanierung-Ziegelhaus“, „Neubau-Ziegelhaus“, „Neubau-Holzhaus“ zusammen.

Zunächst wird eine Bestandsaufnahme des realen Sanierungsobjekts und anschließend die passenden Sanierungsmaßnahmen aufgeführt. Nach der energetischen Sanierungsplanung erreicht das Gebäude den KfW-55 EH Standard. Anschließend werden die Neubauvarianten auf den gleichen Standard ausgelegt. Um die Vergleichbarkeit zu erhöhen, wurde eine detaillierte Wärmebrückenberechnung für jede Variante erstellt. Danach wurde jeweils ein GEG-Nachweis erstellt. Produkt, der Vorarbeit, sind nun drei Mehrfamilienhäuser, die hinsichtlich Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust annähernd gleich sind.

Um die Themenfrage zu beantworten, wird jeweils eine Ökobilanz erstellt. Die Gebäudevarianten werden nach unterschiedlichen Indikatoren verglichen. Zudem wird untersucht welche Materialien bzw. Unterschiede zwischen den Gebäuden die Ökobilanz beeinflussen.

Dabei wird ein Sanierungsobjekt, das standorttreu ist, mit einem Neubau auf einer freien Fläche verglichen. Somit wird der mögliche Abbruch eines Bestandsgebäudes zum Bau eines neuen Gebäudes nicht betrachtet.

Die Arbeit endet mit Schlussfolgerungen zur Beantwortung der Forschungsfragen und soll Vorschläge für zukünftige Förderprogramme liefern.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen zum Thema erläutert, auf denen die folgenden Kapitel aufbauen. Die Grundlagen unterteilen sich in Nachhaltigkeit, Bewertung und Vergleich von Gebäuden und Ökobilanzierung.

2.1. Grundlagen von nachhaltigen Bauen

2.1.1. Aspekte der Nachhaltigkeit

„Das Wort „Nachhaltigkeit“ stammt aus dem Verb „nachhalten“ mit der Bedeutung „längere Zeit andauern oder bleiben““ (Stahr, 2018, S. 12). Eine allgemein gültige Definition wurde im Brundtland-Report niedergeschrieben. Diese besagt, dass eine nachhaltige Entwicklung erreicht wird, „wenn sie den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen“ (Report of the World Commission on Environment and Development, Chapter 2).

Der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ das Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat unterscheidet Nachhaltigkeit in drei Dimensionen:

- Ökologie
- Ökonomie
- Soziokulturelles



Abbildung 9: Dimensionen der Nachhaltigkeit (Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat, 2019)

Zudem untergliedert er weiter nach der Qualität des nachhaltigen Bauens:

Ökologische Qualität

Soll durch eine bestmögliche Wahl von Materialien und Ressourcen, mit möglichst geringen Umweltauswirkungen, erreicht werden

Ökonomische Qualität

Soll durch eine Minimierung der Lebenszykluskosten erreicht werden

Soziokulturelle und funktionale Qualität

Soll durch das Schützen der Gesundheit, der Sicherheit und Behaglichkeit erreicht werden

Technische Qualität

Soll die richtige Ausführung und Planung erreicht werden

Prozessqualität

Soll die Qualität der Planung und der Ausführung erhöhen

Standortmerkmale

Soll die Auswirkung des Gebäudes auf sein Umwelt aufzeigen

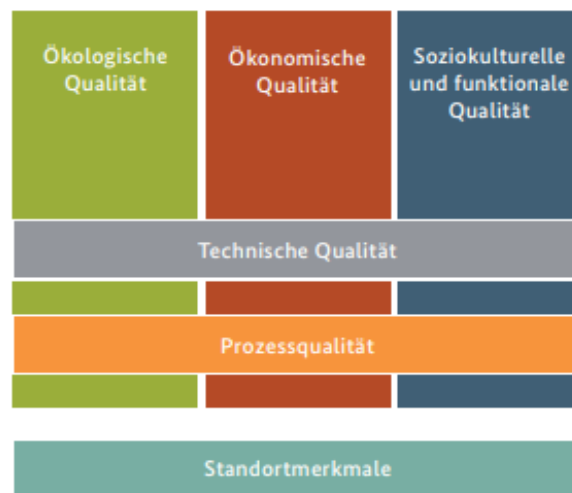


Abbildung 10: Qualität der Nachhaltigkeit (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019)

Die Qualitätsbetrachtung der Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 10) stellt für Gebäude einen passenderen und genaueren Eindruck dar als die allgemein bekannte, die man in Abbildung 9 erkennt.

Da die Themenfrage auf die ökologische Nachhaltigkeit ausgerichtet ist, soll diese im nächsten Unterkapitel weiter erörtert werden.

2.1.2. Ökologische Nachhaltigkeit beim Bauen

Um nachhaltige Gebäude zu errichten, ist es wichtig, auf die ökologische Qualität des Vorhabens zu achten. Dabei ist der Schutz des Menschen und der Umwelt vor negativen Auswirkungen entscheidend.

Friedrichsen gliedert die ökologische Qualität eines Gebäudes in fünf verschiedene Aspekte auf (Friedrichsen, 2018):

Energieeffizienz

Nachhaltige Gebäude müssen energieeffizient sein. Das bedeutet, sie sollen über den ganzen Lebenszyklus die Energienutzung minimieren. Dies beginnt bei der Herstellung der Baustoffe und geht über den Betrieb des Gebäudes bis zum Abbruch.

Baustoffwahl

Baustoffe bilden die Grundsubstanz eines Gebäudes und sind somit von großer Bedeutung. Wichtig ist hierbei der Ressourcenverbrauch. Dieser beinhaltet jedoch nicht nur das Material selbst, sondern auch Energie für Produktion und Transport, wodurch Schadstoffemissionen entstehen.

Flächeninanspruchnahme und -versiegelung

Der Boden erfüllt wichtige Grundfunktionen für unser Ökosystem. Er stellt Lebensraum bereit, regelt den Wasserhaushalt, ist die Basis für Nahrung und dient als CO₂-Speicher. Um diese lebensnotwendigen Funktionen zu erhalten, muss Versiegelung vermieden werden. Es muss der Versiegelungsgrad geprüft und auch andere Standortoptionen, wie Bestandsgebäudeflächen, berücksichtigt werden.

Wasserver- und Entsorgung

Nicht nur Energie und Baustoffe müssen eingespart werden. Auch Wasser erfüllt überlebenswichtige Funktionen und muss in der ökologischen Qualität eines Gebäudes betrachtet werden. Ziel ist hier ein möglichst geringer Trinkwasserverbrauch, beispielsweise durch Grau- oder Regenwassernutzung. Dadurch wird nicht nur Trinkwasser gespart, sondern auch die Kanalisation entlastet.

Bauprozess

Unter Bauprozess wird unter der ökologischen Qualität die Einwirkungen auf die Umwelt durch Lärm, Staub, Abfälle und Schadstoffe verstanden. Diese müssen über die Bauphase minimiert werden.

In dieser Arbeit wird sich vor allem auf Energieeffizienz, die Baustoffwahl und die Flächeninanspruchnahme befasst. Die Energieeffizienz wird im Kapitel 3.2. näher betrachtet. Die Baustoffe werden durch eine Ökobilanz untersucht. Am Schluss soll noch auf den Punkt der Versiegelung und Flächeninanspruchnahme eingegangen werden. Im nächsten Unterkapitel soll auf die Wichtigkeit der Lebenszyklusbetrachtung bei Gebäuden eingegangen werden.

2.1.3. Lebenszyklusbetrachtung

Wenn Gebäude betrachtet werden, soll „Nachhaltigkeit von Gebäuden [...] vermehrt über den Lebenszyklus durch Einbeziehung ökologischer, ökonomischer wie auch sozialer Aspekte transparent, messbar und überprüfbar ausgewiesen werden – bei gleichzeitiger Beachtung der städtebaulichen, gestalterischen, technischen und funktionalen Qualität. Die Beurteilung soll sich dabei auf wissenschaftlich anerkannte Methoden der Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung stützen“ (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019).

Damit betont das Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat, dass, um den Ansprüchen an die Qualität des nachhaltigen Bauens gerecht zu werden, neben der Errichtung des Gebäudes, der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden. Dies beinhaltet den Betrieb, Wartung, Instandsetzung und Rückbau, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen.

Die größte Einflussnahme herrscht in der Planungsphase (siehe Abbildung 11). Dies schließt beispielsweise die Orientierung des Gebäudes zur Sonne oder auch die Standortwahl mit ein. Im Anschluss kann die Gebäudekubatur und Fensterflächen darauf abgestimmt werden. Damit kann in der Nutzungsphase viel Energie eingespart werden und somit über den gesamten Lebenszyklus.

Des Weiteren sollte die Rückbaubarkeit und Umbaubarkeit berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass beispielsweise Einfamilienhäuser so geplant und erbaut werden, um sie bei sich stark ändernden Nutzerzahlen einfach abtrennen und verkleinern zu können. Wohnfläche kann dadurch zukünftig einfach und kosteneffizient umgenutzt werden.

Der Betrieb des Gebäudes ist stark vom Nutzerverhalten und dessen Präferenzen abhängig und lässt sich deshalb schwer steuern.

In der Instandsetzung und Wartung ist gute Zugänglichkeit und der einfache Austausch von Bauteilen wichtig. Dies muss vor allem in der Baukonstruktion und somit bei den Bauteilaufbauten bedacht werden.

Es ist zu erwarten, dass die Entsorgungskosten von Bauabfällen in Zukunft steigen werden. Deshalb ist es empfehlenswert sich schon bei der Planung mit dem Ende des Lebenszyklus der Baumaterialien zu beschäftigen.

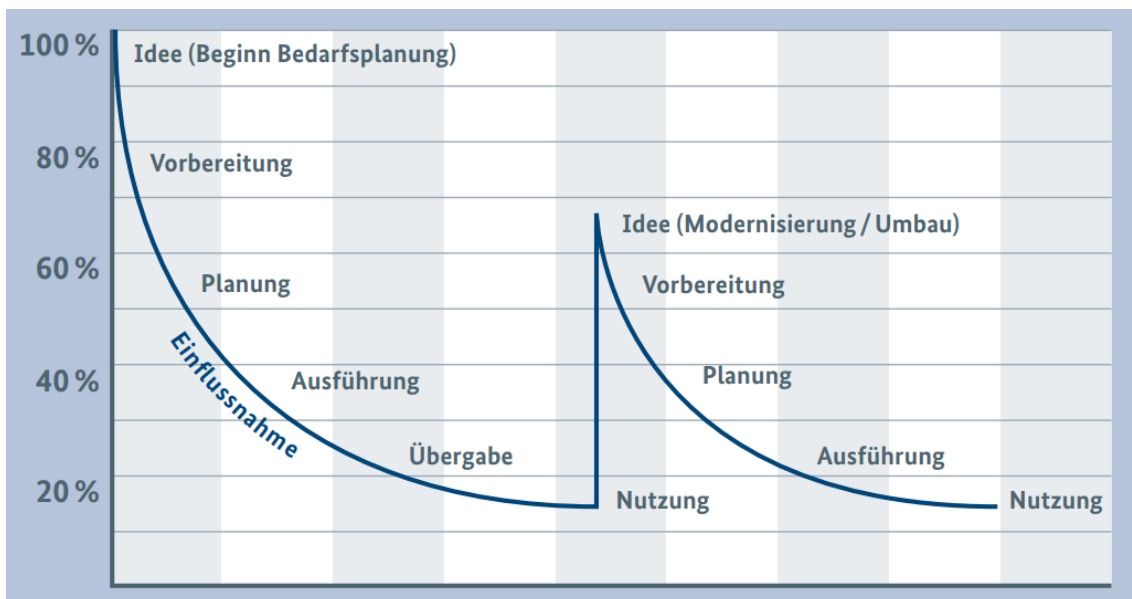


Abbildung 11: Einflussnahmemöglichkeiten auf die Bauwerkseigenschaften während der Planung (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019, S.44)

2.1.4. Bewertung der Nachhaltigkeit

Wie aus den vorherigen Kapiteln ersichtlich wurde, ist Nachhaltigkeit im Gebäudesektor nicht nur nach der trivialen Definition von Ökologie, Ökonomie und Soziales zu betrachten, sondern es müssen spezifischere Punkte bewertet werden. Grund dafür ist die große Masse an Ressourcen und Energie, die in ein Gebäude fließen, und die lange Nutzungsphase von teilweise 80-100 Jahren.

Um die Qualität der Nachhaltigkeit zu bewerten, gibt es Zertifizierungsstellen wie beispielsweise die DGNB. Diese bewertet eine Vielzahl an Kriterien und versucht so nicht nur einzelne Gebäude nachhaltiger zu machen, sondern den Status-Quo zu ändern und somit eine ganze Branche zu formen.

Ein Hilfsmittel zur Bewertung der Nachhaltigkeit, das auch vom DGNB genutzt wird, ist die Ökobilanzierung (vgl. Kapitel 2.3.). Diese wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, um die Ökologische Nachhaltigkeit der Gebäudevarianten zu bewerten.

Um diese jedoch in unserem Fallbeispiel richtig anwenden zu können, wird im Folgenden Kapitel erklärt, wie die Vergleichbarkeit und richtige Bewertung, der Gebäudevarianten im Fallbeispiel, sichergestellt wird.

2.2. Bewertung und Vergleich von Gebäuden

In dieser Arbeit werden drei Gebäude bezüglich den Umweltwirkungen verglichen. Um Vergleichbarkeit zwischen den Varianten herzustellen, braucht es eine ähnliche Ausgangslage in Bezug auf die Energieeffizienz bzw. dem Energiebedarf. Diese soll durch jeweils einen GEG-Nachweis (Gebäude-Energien-Gesetz) aufgezeigt werden.

2.2.1. GEG-Nachweis

Jedes Neubau- und Sanierungsgebäude in Deutschland benötigt einen GEG-Nachweis. Dieser gibt Auskunft über die energetische Mindestqualität, die nach GEG einzuhalten ist. Dafür wird eine Energiebilanz des Gebäudes erstellt. Diese setzt aus dem Transmissionsverlusten über die Gebäudehülle, den Wärmebrückenverlusten aber auch Lüftungsverlusten zusammen. Des Weiteren wird die Ausrichtung des Gebäudes zur Sonne berücksichtigt, wodurch solare Gewinne durch die transparenten Bauteile gewonnen werden. Die Energiebilanz ist zudem stark von der Anlagentechnik abhängig. Dazu zählt die Heizungs- oder Lüftungsanlage, aber auch der verwendete Energieträger und die Effizienz und Anlagenverluste des Gebäudesystems.

Schlussendlich müssen zwei Zielwerte eingehalten werden:

1. **Transmissionswärmeverlust H^T**
2. **Primärenergiebedarf**

Diese Zielwerte sollen im Folgenden kurz erläutert werden, da im Fallbeispiel drei GEG-Nachweise für drei Gebäudevarianten erstellt werden. (Marquardt, 2021)

Dabei setzt sich der Transmissionswärmeverlust H^T aus den Bauteilflächen mit entsprechendem U-Wert und den Wärmebrücken zusammen.

2.2.2. U-Wert

Der U-Wert, auch genannt Wärmedurchgangskoeffizient, gibt an wieviel Wärme pro m^2 Bauteilfläche bei einer bestimmten Temperaturdifferenz fließt. Dabei werden die Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der einzelnen Bauteilschichten eines Bauteils einbezogen, sowie der Wärmeübergangswiderstand zwischen Bauteil und Umgebung. Er wird in $W/(m^2K)$ angegeben. Je kleiner der U-Wert eines Gebäudebauteils, desto geringer ist der Wärmeverlust (vgl. Tabelle 4). (Vogdt, 2022)

2.2.3. Wärmebrücken

Wärmebrücken (WB) stellen Schwachstellen in der Gebäudehülle dar, weshalb diese Bereiche detailliert betrachtet werden müssen.

In der DIN EN ISO 10211 wird die Bezeichnung „Wärmebrücke“ folgendermaßen definiert: „Teil der Gebäudehülle, wo der ansonsten gleichförmige Wärmedurchlasswiderstand signifikant verändert wird durch:

- eine vollständige oder teilweise Durchdringung der Gebäudehülle durch Baustoffe mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und/oder
- eine Änderung der Dicke der Bauteile und/oder
- eine unterschiedlich große Differenz zwischen Innen- und Außenfläche, wie sie bei Wand-, Fußböden- und Decken-Anschlüssen auftritt“ (DIN EN ISO 10211).

WB haben zwei entscheidende Auswirkungen auf ein Gebäude. Zum einen führen WB zu erhöhten Wärmeverlusten. Diese werden bei der Berechnung des Transmissionswärmeverlusts H^T durch den sogenannten Psi-Wert berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.2.4.). Dieser Wert stellt einen längenbezogenen Faktor da. Er ergibt durch Multiplikation mit der Länge der WB den Wärmebrückenzuschlag. Zum anderen führen WB zu niedrigeren Innenoberflächentemperaturen im Vergleich zum umliegenden Bauteil. Das kann bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur zu Tauwasserausfall führen. Je nach Situation und Menge des Wassers kann dies zu Bauschäden wie Korrosion, Materialersetzung oder auch Schimmelpilzbildung führen. (Schild, 2018)

Aus diesem Grund ist es notwendig, schon in der Planungsphase von Gebäuden zu versuchen, WB zu finden und diese zu vermeiden bzw. zu verbessern. Möglich ist das

durch ein geübtes Auge und einer detaillierten Wärmebrückenberechnung. Durch diese können konstruktive Maßnahmen an den einzelnen WB validiert werden und die Bauherren mitgeteilt werden. WB sind Gebäudeecken, Fensterbrüstung /-laibung /-sturz, Traufe oder First. Je nach Gestaltung, Materialbeschaffenheit und Besonderheiten des Gebäudes können verschiedene WB gefunden werden (vgl. Abbildung 12). (Stahr, 2018)

Berechnet werden für einen GEG-Nachweis nur linienförmige WB. Das Ergebnis ist ein Wärmebrückenzuschlag U^{WB} in $[W/m^2K]$. Dieser setzt sich aus der Summe der ψ -Werte multipliziert mit der Länge der jeweiligen WB zusammen, welche anschließend durch die Gebäudehüllfläche geteilt werden (vgl. Formel 1 / 2).

$$H_{T,i} = \Psi_i \cdot l_i$$

Formel 1: Berechnung spezifischer Transmissionswärmeverlust (DIN 4108 Beiblatt 2)

H^{Ti} = Zusätzlicher Transmissionswärmeverlust durch Wärmebrücken in W/K

Ψ^i = Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmebrücke in W/mK

l^i = Länge der Wärmebrücke in m

$$\Delta U_{WB} = \frac{\sum_i H_{T,i}}{A}$$

Formel 2: Berechnung Wärmebrückenzuschlag (DIN 4108 Beiblatt 2)

H^{Ti} = Zusätzlicher Transmissionswärmeverlust durch Wärmebrücken in W/K

A = Wärmeübertragende Umfassungsfläche in m^2 des Gebäudes

ΔU^{WB} = Wärmebrückenzuschlag in W/m^2K

Beispiel detaillierte Wärmebrückenberechnung

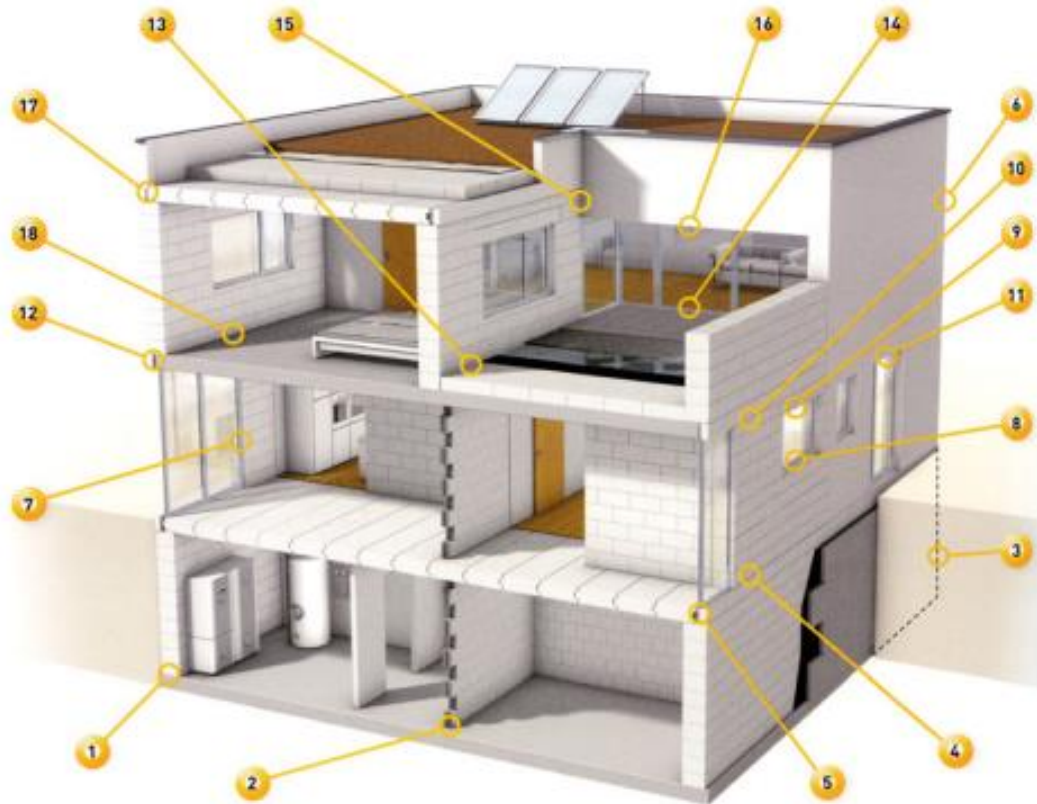


Abbildung 12: Typische Wärmebrücken an einem Wohngebäude (Stahr, 2018, S. 41)

Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung
1	Bodenplatte an Kellerwand	10	Außenwand an Flachdach
2	Bodenplatte an Kellerinnenwand	11	Fenstersturz an Außenwand
3	Kellerecke	12	Fenstersturz an Außenwand
4	Kellerwand an Außenwand	13	Flachdach an Außenwand
5	Kellerwand an Geschossfensterschwelle	14	Flachdach an Fensterschwelle
6	Gebäudeecke	15	Gebäudeinnenecke
7	Fensterlaibung	16	Attika an Fenstersturz mit Rollo
8	Fensterbrüstung	17	Attika an Wand
9	Fenstersturz mit Rollo	18	Außenwand an Außenwand

Tabelle 1: Bezeichnungen der Wärmebrücken aus Abbildung 8

2.2.4. Transmissionswärmeverlust

Der Transmissionswärmeverlust eines Gebäudes setzt sich einerseits aus der Hüllfläche und den jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizient (U-Werten) zusammen andererseits durch den Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} . Des Weiteren ist der Temperaturunterschied zwischen Innen und Außen von Belang. In unserem Fall beziehen wir uns auf den spezifischen Transmissionswärmeverlust, der von der wärmeübertragenden Bauteilfläche in m^2 abhängt. Das bedeutet, der Transmissionswärmeverlust kann durch Erhöhung der Dämmstärken oder auch der Verbesserung von Wärmebrücken gesenkt werden.

$$H_T = \sum (F_{x,i} \cdot U_i \cdot A_i) + \Delta U_{WB} \cdot A$$

Formel 3: Berechnung des Transmissionswärmeverlustes H^T (DIN 4108 Beiblatt 2)

H^T = Zusätzlicher Transmissionswärmeverlust durch Wärmebrücken in W/K

$F^{x,i}$ = dimensionsloser Temperatur-Korrekturfaktor

U_i = Wärmedurchgangskoeffizient in W/m^2K

A_i = Fläche des Bauteils i in m^2

ΔU^{WB} = Wärmebrückenzuschlag in W/m^2K

A = Wärmeübertragende Umfassungsfläche in m^2 des Gebäudes

$$H'_T = \frac{H_T}{A_{Hüllfläche}}$$

Formel 4: Berechnung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes H^T (DIN 4108 Beiblatt 2)

H^T = Zusätzlicher Transmissionswärmeverlust durch Wärmebrücken in W/K

A = Hüllfläche des Gebäudes in m^2

H^T = Spezifischer Transmissionswärmeverlust durch Wärmebrücken auf wärmeübertragende Umfassungsfläche in W/m^2K

2.2.5. Jahres-Primärenergiebedarf

Primärenergie stellt die Energie dar, die in der Natur vorkommt und entweder frei oder gebunden ist. Dazu zählen Energieträger wie fossile Brennstoffe, aber auch erneuerbare Energien. Bei der Nutzung der Primärenergie gibt es jedoch Verluste in den Umwandlungs-/Transportprozessen wie z.B. Verbrennung, wodurch ein Teil der zuvor vorhandenen Energie verloren geht und nicht genutzt werden kann. Die Energiemenge, die überbleibt, nennt man Sekundärenergie. Die Energiemenge, die beim Endkunden vor der Nutzung ankommt, wird als Endenergie bezeichnet. (Pehnt, 2010)

Um den Primärenergiebedarf eines Gebäudes zu erfassen, wird eine Energiebilanz aufgestellt. Diese ist festgelegt in der DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10. Diese Bilanz spaltet sich in zwei Teile auf, der baulichen Seite und der anlagentechnischen Seite.

Zur Ermittlung des Jahresheizwärmebedarf wird dann ein Monatsbilanzverfahren nach DIN 4108-6 angewandt. Dieses modelliert den Bedarf über ein ganzes Jahr gesehen, mit zum Beispiel sich ändernden Temperaturen und veränderten Sonnenständen.

Schritte zum Jahres-Primärenergiebedarf nach GEG:

1. Geometrische Randbedingungen des Gebäudes erfassen (Gebäudevolumen, Umfang, Geschosshöhe, ...)
2. Spezifischen Transmissionswärmeverlust H^*T bestimmen
3. Prüfung, ob H^*T des Gebäudes den Maximalwert des Referenzgebäudes nicht überschreitet
4. Berechnung der spezifischen Lüftungswärmeverluste (sowohl für reales Gebäude als auch Referenzhaus)
5. Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarf mit dem Monatsbilanzverfahren (sowohl für reales Gebäude als auch Referenzhaus)
6. Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarf mit dem Tabellenverfahren (sowohl für reales Gebäude als auch Referenzhaus) (Marquardt, 2021, S. 298–372)

Im Fallbeispiel werden drei GEG-Nachweise durchgerechnet. Dies geschieht mit Hilfe des Programms „Energieberater Professionel 3D PLUS“. Im Anhang A - C können die GEG-Nachweise eingesehen werden und dienen ebenso als Beispiele für dieses Kapitel.

2.2.6. KfW 55 Effizienzhaus

Die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) ist eine Anstalt des öffentlichen Rechts. Eigentümer des Kapitals ist der Bund, welcher ebenso haftet. Das bedeutet, die KfW gibt Förderungen aus, die den Zielen der Bundesregierung entsprechen. Durchgesetzt wird die Förderung von Wohngebäuden durch KfW Effizienzhaus-Stufen.

„Ein Effizienzhaus ist ein energetischer Standard für Wohngebäude. Er setzt sich aus 2 Kriterien zusammen: Wie hoch ist der Gesamtenergiebedarf der Immobilie? Und wie gut ist die Wärmedämmung der Gebäudehülle? Das wird mit den Werten Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust angegeben“ (KfW, 2022). Das bedeutet eine Effizienzhaus-Klasse stellt eine Übererfüllung der aktuellen gesetzlichen Mindestanforderungen dar.

2.2.6.1. Mindestanforderungen

Es gibt mehrere Effizienzhausstufen von 40-85. Je geringer die Kennzahl, desto geringer ist der Primärenergiebedarf des Gebäudes. Die Zahlen beziehen sich auf das Referenzgebäude des GEG. Beispielsweise benötigt das KfW 55 EH nur 55% der Primärenergie, die das Referenzhaus braucht. Außerdem liegt der Transmissionswärmeverlust 30% niedriger als beim Referenzgebäude. Zur Veranschaulichung der verschiedenen Klassen ist Tabelle 2 aufgeführt.

Effizienzhaus (EH)	Primärenergiebedarf	Transmissionswärmeverlust
EH 40	40%	55%
EH 55	55%	70%
EH 70	70%	85%
EH 85	85%	100%

Tabelle 2: Auflistung der Effizienzhausstufen mit Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust (KfW, 2022)

2.2.6.2. Neubaustandard 2023

Im Mai 2020 wurde von Vizekanzler Robert Habeck der Arbeitsplan Energieeffizienz vorgestellt. Dieser sieht vor, den Neubau-Effizienzstandard des GEG im Jahr 2023 auf den eines KfW 55 EH zu erhöhen. Weiter soll dieser ab 2025 erhöht werden, auf ein KfW 40 EH Standard. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022)

Im Fallbeispiel werden alle drei Gebäudevarianten auf den Neubaustandard 2023, dem KfW 55 EH ausgelegt.

2.3. Ökobilanz

Der Begriff Ökobilanz oder auch Lebenszyklusanalyse ist abgeleitet vom englischen „life-cycle assessment“ (LCA). Darunter definiert die Norm, die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Output Einflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (DIN EN ISO 14040, 2006, S.6). Zur Standardisierung werden die potenziellen Umweltwirkungen immer auf eine funktionelle Einheit bezogen. (Frischknecht, 2020)

Die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes, die bei dessen Bilanzierung berücksichtigt werden, wurden in der DIN EN 15978 festgelegt und sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

LEBENSWEG-PHASEN	A 1-3			A 4-5		B 1-7							C 1-4				D
	HERSTELLUNGS-PHASE			ERRICHTUNGS-PHASE		NUTZUNGSPHASE							ENDE DES LEBENS-ZYKLUS				VORTEILE UND BELASTUNGEN AUSSERHALB DER SYSTEM-GRENZE
	ROHSTOFFBESCHAFFUNG	TRANSPORT	PRODUKTION	TRANSPORT	ERRICHTUNG / EINBAU	NUTZUNG 1	INSTANDHALTUNG 2	INSTANDESETZUNG	AUSTAUSCH 2	MODERNISIERUNG	ENERGIEVERBRAUCH IM BETRIEB	WASSERVERBRAUCH IM BETRIEB	RÜCKBAU / ABRISS	TRANSPORT	ABFALLVERWERTUNG	ENTSORGUNG	POTENTIAL FÜR WIEDERWERTUNG, RÜCKGEWINNUNG UND RECYCLING
Module gemäß DIN EN 15978	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Abbildung 13: Darstellung der Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15978 (DGNB GmbH, 2018a)

Der Lebenszyklus eines Gebäudes lässt sich in vier Lebenszyklusphasen einteilen, die Herstellungsphase (A1-3), Errichtungsphase (A4-5), die Nutzungsphase (B1-7) und das Ende des Lebenszyklus (C1-4). Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling werden im Modul D betrachtet. Dieses befindet sich nach dem Ende des Lebenszyklus und liegt außerhalb der Systemgrenzen (vgl. Abb. 13). Um die genannten Lebenszyklusphasen zu bilanzieren, unterteilt sich eine Ökobilanz nach DIN ISO 14040 in vier Schritte, der Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und der Auswertung. (Frischknecht, 2020)

Bei einer Ökobilanz können mehrere Umweltauswirkungen untersucht werden. Diese werden durch Wirkungskategorien dargestellt. Da die Klimakrise bzw. die Erderwärmung immer weiter an Bedeutung gewinnt, soll die Wirkungskategorie Treibhauspotential (GWP) und die totale nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT) in dieser Arbeit als Leitgröße gelten. Außerdem sollen die Wirkungskategorien Aufschluss über die ökologische Nachhaltigkeit geben.

In der vorliegenden Arbeit wird neben Neubaugebäuden auch ein Sanierungsgebäude mit Bestandsmaterialien untersucht. Dabei werden Bestandsmaterialien und neue Materialien verschieden bilanziert:

Bilanzierung von Neubauten

Neu eingebaute Materialien werden über den gesamten Lebenszyklus, also ab der Herstellung über die Errichtung bis zur Entsorgung, betrachtet. Damit geht der gesamte Lebenszyklus in die Bilanz ein.

Berechnung Neumaterial: Herstellung + Ende des Lebenszyklus

Bilanzierung von Sanierungsgebäuden

Bestandsmaterialien werden gesondert berechnet. Die Baustoffe haben bereits einen ersten Gebäudelebenszyklus durchlaufen. Da sie einfach weiterverwendet werden, wird die Herstellung nicht mehr betrachtet. Somit geht nur das Lebenszyklusende in die Bilanzierung ein.

Berechnung Bestandsmaterialien: Ende des Lebenszyklus

Biogene Stoffe in Ökobilanzen

Baustoffe wie Konstruktionsholz oder Holzwerkstoffe zählen zu den biogenen Stoffen. Diesen wird in der Herstellungsphase beim GWP eine Gutschrift zugeschrieben. Ebenso geht aber auch das Lebensende negativ mit ein, wodurch sich die Werte ausgleichen. Dies gilt aber nur für neu eingebaute biogene Materialien.

Falls beispielsweise Holz in Sanierungsgebäuden berechnet wird, erhält man hohe Emissionswerte. Dies liegt an der fehlenden Mitbilanzierung der Herstellungsgutschriften. Im Fallbeispiel wird dieser besondere Fall näher erklärt (vgl. Kapitel 3.4.6.).

Zur besseren Bewertung und vor allem Vergleichbarkeit von Ökobilanzen von Gebäuden wurde vom Bundesbauministerium eine Ökobilanzdatenbank erstellt. Die sogenannte „Ökobau.dat“, welche als Datengrundlage für die vorliegende Arbeit dient. Zudem wurde die Bilanzierungssoftware eLCA, die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) entwickelt wurde, verwendet. Dieses Tool greift wiederum auf die Ökobau.dat als Datenbank und weiteren Eingangsgrößen wie beispielsweise die Bruttogrundfläche zurück.

3. Fallstudie:

Energetische Planung und Ökobilanzierung eines Einfamilienhauses aus 1942

Im Kapitel 3 sollen drei Gebäudevarianten zunächst energetisch geplant und anschließend durch eine Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Als Ausgangspunkt dient ein Mehrfamilienhaus, das saniert werden soll. Dieses wird mit zwei Neubauten auf unbebauten Baugrundstücken verglichen. Die Neubauvarianten aus Ziegel und Holz sind dem Sanierungsobjekt, bis auf die Bauteilaufbauten, identisch. Dies bedeutet gleiche Orientierung, Grundrisse und Bauteilflächen für alle drei Gebäude.

Unterstützt wurde diese Arbeit vom Ingenieurbüro HeimatPlanung GmbH, welche Planunterlagen bereitstellten und der Nutzung ihrer Programme zustimmten.



Eigene Darstellung (Farbwahl wird so weitergeführt)

3.1. Bauliche und energetische Bestandserfassung

Das zweistöckige Gebäude mit Satteldach und Garagenanbau befindet sich auf einem Grundstück in 84432 Hohenpolding und liegt in der zur Verwaltungsgemeinschaft Steinkirchen zählenden Gemeinde Hohenpolding des Landkreises Erding in Bayern.

Das Wohnhaus wurde nach Angaben der Besitzer im Jahr 1942 in Massivbauweise errichtet. Es besitzt eine Satteldachkonstruktion und der Dachfirst verläuft in Südwest-Nordost-Richtung. Das Wohnhaus ist nur im Erd- und Obergeschoss ausgebaut und bewohnbar. Das Dachgeschoss wurde als Speicherfläche genutzt.

Planunterlagen wurden von den Besitzern maßstabsgetreu angefertigt. Die Außenmaße als auch die Raumanordnung wurden durch Nachmessen plausibilisiert, so dass die in den Planunterlagen angegebenen Maße, mangels weiterer Planunterlagen, für die Bewertung herangezogen werden.

Das Gebäude besitzt eine Grundfläche von 122 m² und verfügt über ein westlich an das Wohnhaus angrenzenden unbeheizten Garagenbau.



Abbildung 14: Nord-Ost Ansicht (eigene Aufnahme)



Abbildung 15: Sanierungsobjekt Nordwestansicht (eigene Aufnahmen)



Abbildung 16: Sanierungsobjekt Südansicht (eigene Aufnahmen)

Energetische Bestandserfassung:

Das Satteldach ist als Holzbalkenkonstruktion mit Ziegeldeckung erbaut. Teilweise ist es provisorisch gedämmt.

Den oberen Abschluss der thermischen Gebäudehülle stellt die oberste Geschossdecke dar. Diese ist als 200mm starke Holzbalkendecke ausgeführt und wird von Holzbrettern umschlossen. An der Unterseite besitzt sie eine 20mm dicke Dämmung mit Holzwolle-Leichtbauplatten, die wiederum mit Innenputz versehen ist.

Die Außenwände sind in Massivbauweise ausgeführt und entsprechen dem seitlichen Gebäudeabschluss. Das Mauerwerk besitzt einem λ -Wert von $0,62 \text{ W/mK}$ [eigene Annahme]. Sowohl Innen- als Außenseite wurde verputzt und gestrichen. Unterschieden muss hier zwischen der Außenwand gegen Außenluft und der Außenwand gegen Unbeheizt.

Am seitlichen Gebäudeabschluss haben zudem Geschossfenster und Hauseingangstür teil. Die Fenster sind Holzsprossenfenster bzw. -fenstertüren mit Isolierverglasung und wurden im Jahre 1994 erneuert. Auch die Eingangstür aus Holz mit Sprossenteilung im oberen Bereich und Glasausschnitten wurde miterneuert. Erstere besitzen einen U-Wert von ca. $2,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ und zweite einen U-Wert von $2,30 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Abbildung 17: Sanierungsobjekt Fenster und Wärmeübergabe (eigene Aufnahmen)



Abbildung 18: Sanierungsobjekt Dachaufbau (eigene Aufnahmen)

Den unteren Abschluss der thermischen Hülle ergibt die Bodenplatte gegen Erdreich im Erdgeschoss, da kein Keller vorhanden ist. Dieser Punkt ist von besonderem Interesse, da das Gebäude keine Stahlbeton-Bodenplatte hat, sondern auf Streifenfundamenten unter den Außen- und Innenwänden fußt. Durch Aufbrechen des ursprünglichen Bodenaufbaus, der aus 60mm Zement-Estrich und 10mm Bodenbelag bestand, wurde erkenntlich, dass die Erbauer direkt auf Sand ihren Bodenaufbau erstellten.

Bauschäden und Instandhaltungsrückstand:

Das Gebäude weist verschiedene Bauschäden auf. An den Außenwänden des Wohnzimmers ist im Sockelbereich aufsteigende Feuchte zu erkennen. Zudem gibt es Farb-abplatzungen. Ablagerungen am Bodenbelag der Dusche und unterschiedliche Fliesenbeläge im Bad des Erdgeschosses sind vorhanden. Im Bereich der Waschbeckeninstallation gibt es geöffnetes und nicht verputztes Mauerwerk. Die Innentüren weisen am Rahmen sowohl am Sturz als auch der Türschwelle Beschädigungen auf. Die Innentreppe weist Mängel auf und ist nicht mehr zeitgemäß. Auffällig sind viele Deckenrisse im Obergeschoss des Gebäudes. Die Geschossfenster sind teilweise undicht. Eine Absturzsicherung an der Fenstertüre im Flur des Obergeschosses fehlt. Die Elektroinstallation ist veraltet und nicht mehr zeitgemäß. Das Satteldach misst eine Wärmedämmung und es gibt mehrere Ritzen zwischen den Dachziegeln. Außerdem sind mehrere Dachziegel auf der nördlichen Dachfläche im Giebelbereich abgedeckt und führen zu Wassereindringungen.



Abbildung 19: Veraltetes Stromsystem bzw. Sicherungskasten (eigene Aufnahme)



Abbildung 20: Farbabplatzungen und Schimmel an Außenwand (eigene Aufnahme)



Abbildung 21: Heizungsanlage (Nachtspeicheröfen) im Sanierungsgebäude (eigene Aufnahmen)



Abbildung 22: Veraltete und unfachmännisch verbaute Warmwasserbereitung (elektrischer Warmwasserboiler) (eigene Aufnahmen)



Abbildung 23: Putzabplatzungen an Außenwand (eigene Aufnahmen)



Abbildung 24: Fehlender Fußbodenbelag (eigene Aufnahmen)



Abbildung 25: Raumseitig verlegte Verteilleitungen für Heizkörper (eigene Aufnahmen)

Zusammenfassende Beurteilung des Gebäudes:

Das bestehende Wohnhaus entspricht hinsichtlich Grundrissgestaltung und der Gebäudeausstattung nicht mehr den heutigen Wohnanforderungen, wie Lichteinfall und Raumaufteilung. Zudem ist das Gebäude als Einfamilienhaus erbaut worden und soll nun als Mehrfamilienhaus genutzt werden. Das Gebäude ist somit ohne Bauliche Änderungen nicht vermietbar, jedoch noch weiter für Selbstzwecke bewohnbar.

Einige Bauteile haben das Ende ihres Lebens erreicht und müssen instandgesetzt werden. Der energetische Zustand entspricht den Anforderungen der Bauzeit, jedoch nicht mehr den heutigen Ansprüchen. Um also ein zukunftsfähiges Vermietungsobjekt zu erstellen, müssen umfassende Maßnahmen ergriffen werden.

In Tabelle 3 wurden die U-Werte und Flächen der Bauteile des Bestandsgebäudes aufgelistet. Im Anhang M können die Berechnungsunterlagen und damit auch die Annahmen zu Bauteilaufbauten eingesehen werden.

	Bodenplatte	Außenwand	Außenwand gegen unbeheizte Garage	Hauseingangstür	Nebeneingangstür	Geschossfenster	Oberste Geschossdecke
U-Wert [W/m ² K]	1,41	1,44	1,27	2,3	2,3	2,7	1,03
Fläche [m ²]	122	186	20,8	2,5	2,2	32	122

Tabelle 3: Gebäudedaten zum Sanierungsobjekt (vgl. Anhang M)

3.2. Energetische Maßnahmenplanung

Die Energetische Maßnahmenplanung beinhaltet die Dämmung der gesamten thermischen Gebäudehülle. Das bedeutet die Dämmung der Bodenplatte, der Außenwände, des Dachs und das Verbauen von wärmeschutzverglasten Fenstern. Die Dämmung der Gebäudehülle führt zu einem niedrigeren Energieverbrauch und senkt die Energiekosten über die Betriebsphase. Darüber hinaus führt die Dämmung zu höheren Innenoberflächentemperaturen der Wände. Das steigert die Behaglichkeit, das Raumklima und senkt das Risiko für Bauschäden oder Schimmel. Eine fachmännisch ausgeführte Dämmung von Bauteilen senkt außerdem das Risiko für Wärmebrücken. Für eine gesamtliche Sanierung muss neben der Gebäudedämmung auch eine durchgehende Luftdichtheitsebene sichergestellt werden. Dazu tragen vor allem die Fenster und das Dach bei. (Giebeler et al., 2008)

Darüber hinaus umfasst die Maßnahmenplanung auch die technische Gebäudeausstattung. Diese ist für den Endenergiebedarf des Gebäudes entscheidend. Die wesentlichen Teile der technischen Gebäudeausstattung sind Wasserversorgung/-entsorgung, Gebäudeheizung/-kühlung, Lüftung, Elektroversorgung und technische Sondereinrichtungen wie Brandschutzsysteme oder Fahrsysteme. Im Fallbeispiel wollen wir nach GEG vorgehen und betrachten somit nur die Gebäudebeheizung inklusive Warmwasserbereitung und die Lüftung. (Giebeler et al., 2008)

In diesem Fallbeispiel werden drei Varianten desselben Gebäudes verglichen. Die energetischen Maßnahmen wurden dabei mit dem Programm Energieberater 18599 geplant. Dieses wurde von dem Ingenieurbüro HeimatPlanung GmbH zur Verfügung gestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Varianten weitestgehend gleiche Transmissionswärmeverluste und einen vergleichbaren Primärenergiebedarf besitzen. Die Gebäudetechnik ist bei allen Gebäuden identisch.

Da die Varianten im Folgenden nach der DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 berechnet werden, ist außerdem ein Wärmebrückenzuschlag notwendig. Dieser kann auf verschiedene Arten wie pauschalen Zuschlagswerten oder Gleichwertigkeitsprüfungen ermittelt werden. In unserem Fall soll eine detaillierte Wärmebrückenberechnung erfolgen. Dadurch kann genauer auf Baudetails eingegangen werden und man bestimmt einen realistischeren Zuschlagswert. (Marquardt, 2021) Dies geschieht mit dem

kostenpflichtigen Programm ZUB Argos das vom Ingenieurbüro HeimatPlanung GmbH zur Verfügung gestellt wurde.

Ziel der Anpassung der drei Gebäudevarianten ist die Auslegung auf ein KfW 55 EH. Dieses Effizienzklasse wurde gewählt, da es 2023 das neue Neubaustandard werden soll. Nachgewiesen wird der Standard durch einen GEG-Nachweis. Aufgeteilt ist das Kapitel der Energetischen Maßnahmenplanung nach Gebäudehülle, Anlagentechnik und einer detaillierten Wärmebrückenberechnung der jeweiligen Variante.

3.2.1. Variante 1: Sanierung zum KfW 55 Effizienzhaus

Bei der Variante 1 handelt es sich um die Sanierung des zuvor untersuchten Altbaugebäudes aus 1942. Es soll eine energetische Sanierungsplanung durchgeführt werden.

3.2.1.1 Gebäudehülle

	U-Wert [W/m ² K] vor Sanierung	U-Wert [W/m ² K] nach Sanierung	Maßnahme
Bodenplatte	1,41	0,20	Erstellung einer gedämmten Bodenplatte
Außenwand gegen Außenluft	1,44	0,18	Dämmung mit 160mm Mineralwolle
Außenwand gegen unbeheizte Garage	1,27	0,29	Dämmung mit 100mm Mineralwolle
Geschossfenster	2,7	0,75	Austausch
Dachfenster	nicht vorhanden	1,00	Neueinbau wegen Dacherneuerung
Hauseingangstür	2,3	0,85	Austausch
Nebeneingangstür	2,3	1,0	Austausch
Geschossdecke/ Dach	1,03	0,14	Ausbau Dachgeschoss -> Dach ist oberer Abschluss

Tabelle 4: Auflistung der U-Werte der Variante 1

Dämmung der Bodenplatte

Wie in der Bestandserfassung erwähnt, besitzt das Gebäude keine ordentliche Gründung, auf der es sich lohnt, einen teuren und hochwertigen Bodenaufbau zu erstellen (vgl. Kapitel 3.1.). Da das Gebäude jedoch eine ganze Nutzungsphase vor sich hat, wurde sich für eine Neuerstellung der Bodenplatte entschieden. So können Wassereindringungen vermieden und eine plane und dauerhafte Tragschicht gewährleistet werden. Dadurch wird die Langlebigkeit des Bodens garantiert.

Es wurde ein spezieller, niedrig aufbauender Bodenaufbau gewählt, um die Raumhöhe möglichst groß zu halten.

Nachdem der Sandboden im Erdgeschoss um 150mm abgetragen wurde, ist eine ebenso starke Stahlbetonbodenplatte erstellt worden. Diese ist mit 100mm PUR-Dämmung überdämmt worden. PUR wurde vor allem wegen der guten Dämmeigenschaft und dadurch niedrigeren Aufbauhöhe ausgewählt. Im Anschluss wird eine Trittschalldämmung verbaut, die durch Trennung der Schichten zu einer Minderung des Trittschalls führt. Außerdem dient diese als Installationsebene für die Fußbodenheizung. Zur Vermeidung von Schallbrücken wird im Anschluss eine Estrichfolie verlegt. Darauf wird 65mm Fließestrich aufgebracht. Dieser dient als Ausgleichschicht und erzeugt eine ebene Fläche zur Verlegung des Fußbodens. Der U-Wert der Bodenplatte hat sich durch die Bauteilplanung auf einen Wert von 0,20 W/(m²K) verbessert.

Bauteil:		Bodenplatte gegen Erdreich (Neu)				Fläche : 122,00 m ²	
Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand		
		cm	W/(mK)	kg/m ³	m ² K/W		
1	Bodenbelag	1,50	1,300	2300,0	0,01		
2	Estrich	6,50	1,400	2000,0	0,05		
3	Estrichfolie	0,02	0,170	1390,0	0,00		
4	Trittschalldämmung	2,50	0,045	260,0	0,56		
5	PUR - WLS 024	10,00	0,024	30,0	4,17		
6	Abdichtung	0,09	0,230	1050,0	0,00		
7	Stahlbetonbodenplatte	15,00	2,300	2400,0	0,07		
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 0,90		R = 4,85		
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,17	
122,00 m ²		23,3 %	535,2 kg/m ²	24,30 W/K	22,8 %	R _{so} = 0,00	
				10cm-Regel :	5402 Wh/K	U - Wert 0,20 W/m²K	
				3cm-Regel :	1999 Wh/K		

Tabelle 5: Aufbau Bodenplatte der Variante 1 (vgl. Anhang A)

Fassadendämmung

Das Gebäude aus 1942 besitzt ein Bestandsmauerwerk mit 300mm, das von Innen- und Außenputz umschlossen ist. Im Zuge der Sanierung werden die Putze entfernt und der Innenputz neu aufgetragen. Die Außenseite des Mauerwerks wird im Anschluss mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) versehen. Dieses ist 160mm stark und

besteht aus Mineral-/Steinwolldämmplatten mit der Wärmeleitgruppe 035. Da sich besagte Dämmplatten, ohne weitere Behandlung, verputzen lassen, wird als äußerste Schutzschicht der passende Systemputz aufgetragen. Der U-Wert der Außenwände hat sich durch die Dämmung von 1,44 W/(m²K) auf 0,18 W/(m²K) verbessert.

Des Weiteren wird die Außenwand gegen die unbeheizte Garage mit 100mm Mineral-/Steinwolldämmplatten mit der Wärmeleitgruppe 040 gedämmt und verputzt. Dadurch erreicht das Bauteil einen U-Wert von 0,29 W/(m²K)

Bauteil:		Außenwand Norden				Außenwand Osten				Außenwand Süden				Außenwand Westen				Fläche / Ausrichtung :	
																		64,10 m² N	
																		37,80 m² O	
																		57,10 m² S	
																		27,00 m² W	
	Nr.	Baustoff				Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand										
						cm	W/(mK)	kg/m³	m²K/W										
	1	Innenputz				1,50	0,700	1400,0	0,02										
	2	Mauerwerk (Bestand)				30,00	0,460	950,0	0,65										
	3	Mineral-/Steinwolldämmplatten - WLS 035				16,00	0,035	60,0	4,57										
	4	Systemputz				1,00	0,560	1000,0	0,02										
	Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!						R_{zul} = 1,20				R = 5,26								
	Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse		spezif. Transmissionswärmeverlust		wirksame Wärmespeicherfähigkeit												
	186,00 m²		35,5 %		325,6 kg/m²		34,24 W/K		32,1 %		10cm-Regel : 5257 Wh/K		3cm-Regel : 1821 Wh/K						
													R _{si} = 0,13						
												R _{se} = 0,04							
												U - Wert							
												0,18 W/m²K							

Tabelle 6: Aufbau Außenwand der Variante 1 (vgl. Anhang A)

Bauteil:		Außenwand gegen unbeheizte Garage				Fläche / Ausrichtung :								
						20,80 m² W								
	Nr.	Baustoff				Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand					
						cm	W/(mK)	kg/m³	m²K/W					
	1	Innenputz				1,50	0,700	1400,0	0,02					
	2	Mauerwerk (Bestand)				30,00	0,460	950,0	0,65					
	3	Dämmung - WLS 040				10,00	0,040	60,0	2,50					
	4	Systemputz				1,00	0,560	900,0	0,02					
	Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!						R_{zul} = 1,20		R = 3,19					
	Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse		spezif. Transmissionswärmeverlust		wirksame Wärmespeicherfähigkeit							
	20,80 m²		4,0 %		321,0 kg/m²		6,03 W/K		5,7 %		10cm-Regel : 588 Wh/K		3cm-Regel : 204 Wh/K	
													R _{si} = 0,13	
												R _{se} = 0,13		
												U - Wert		
												0,29 W/m²K		

Tabelle 7: Aufbau Außenwand gegen unbeheizte Garage der Variante 1 (vgl. Anhang A)

Fenstersanierung

Die eingebauten Fenster sind in ihrer Funktion und Wärmedämmung eingeschränkt und müssen deshalb ausgetauscht werden. Es werden Geschossfenster mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,75 W/(m²K) eingebaut. Die Dachflächenfenster werden ebenfalls gegen eine Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von 1,00 W/(m²K) ausgetauscht.

Dachdämmung

Das Dachgeschoss soll zukünftig als Wohnraum genutzt werden. Aus diesem Grund wird das Satteldach komplett erneuert. Dabei handelt es sich um ein Sparrendach mit 200mm starken Sparren. Der entstehende Hohlraum wird mit Mineralwolle – WLS 035 ausgedämmt. Die Konstruktion wird im Anschluss mit 100mm Holzfaserdämmung – WLS 046 überdämmt. Die größere Masse der Holzfaserdämmung stellt einen erhöhten sommerlichen Wärmeschutz dar. Darauf wird aus Feuchteschutzgründen eine diffusionsoffene Dachauflegebahn befestigt. Auf der Innenseite der Zwischensparrendämmung wird eine Dampfbremse aufgebracht, um die Dämmung vor Feuchte zu schützen. Durch die genannten energetischen Maßnahmen erreicht das Satteldach einen U-Wert von 0,14 W/(m²K).

Bauteil:		Satteldachfläche Norden		Satteldachfläche Süden		Fläche / Ausrichtung :		77,76 m²	N	
								79,52 m²	S	
	Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand				
			cm	W/(mK)	kg/m³	m²K/W				
	1	Gipskartonplatten	1,25	0,250	900,0	0,05				
	2	Luftschicht/Installationsebene	3,00	0,250	1,0	0,12				
	3	Dampfbremse	0,02	0,300	1100,0	0,00				
	Gefach - Stützen- / Balkenbreite: 12,0 cm; Zwischenraum (Füllung): 70,0 cm									
	4	Sparren	20,00	0,130	500,0	1,54				
		Mineralwolle - WLS 035		0,035	260,0	5,71				
	5	Holzfaserdämmung - WLS 046	10,00	0,046	290,0	2,17				
	6	Diffusionsoffene Dachauflegebahn	0,05	1,000	100,0	0,00				
7	Luftschicht	4,00	-	1,0	---					
8	Lattung	3,00	-	500,0	---					
9	Dachziegelsteine	4,00	-	2000,0	---					
Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Abschnitte (siehe Skizze)									R _{1,A} = 3,88	
									R _{1,B} = 8,06	
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!							R_{m,zul} = 1,0		R_m = 6,72	
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,10				
157,27 m²		30,0 %	194,6 kg/m²	22,73 W/K	21,3 %	10cm-Regel : 798 Wh/K		R _{so} = 0,10		
						3cm-Regel : 492 Wh/K		U - Wert		
								0,14 W/m²K		

Tabelle 8: Aufbau Satteldach der Variante 1 (vgl. Anhang A)

3.2.1.2. Anlagentechnik

Heizung und Warmwasser

Eine Komplettsanierung stellt die Vorhabenträger vor die Entscheidung für ein neues Heizungssystem. Dabei muss über den Brennstoff, die Verteilung der Wärme, die Kosten und die Umweltverträglichkeit der neuen Anlage berücksichtigt werden. Mit dem Hintergrund der aktuell stark steigenden Kosten für fossile Brennstoffe, werden erneuerbare Energien immer attraktiver und vor allem sinnvoller. Es gibt verschiedenste Optionen, diese im Sanierungsbau einzusetzen. Zum einen besitzt das betrachtete Gebäude einen sehr niedrigen Energieverbrauch. Zum anderen besitzt es eine zum großen

Teil eine Flächenheizung (Fußbodenheizung) die als Niedrigenergiesystem läuft. Aus diesen Gründen wird in das Sanierungsobjekt eine Wärmepumpe eingebaut.

Bei dem Tausch der Heizung gegen eine Wärmepumpe bleibt der Heizkreislauf bestehen und der Kessel entfällt. Die Wärmepumpe entnimmt ihre Energie dem Erdboden (Sole-Wasser-Wärmepumpe) oder, wie in unserem Fall, der Umgebungsluft (Luft-Wasser-Wärmepumpe) (vgl. Tabelle 9). Vorteile einer Luft-Wasser-Wärmepumpe sind eine günstigere Anschaffung und ein geringer Flächenverbrauch (Stahr, 2018). Unterstützt wird diese durch einen elektrischen Heiz-Stab, der sich automatisch einschaltet, wenn zu niedrige Außentemperaturen herrschen. Wärmepumpen lassen sich zudem gut mit Photovoltaik-Anlagen kombinieren, um die Betriebskosten zu senken und die Autarkie zu erhöhen (Bosch Thermotechnik GmbH).

Damit die Heizungsanlage effizient betrieben werden kann, besitzt diese einen 950L großen Pufferspeicher, leistungsgeregelte Umwälzpumpen und vollständig gedämmte Leitungen.

Die Warmwasserbereitung erfolgt zentral über die Heizungsanlage. Das Warmwasser wird über eine Verteilung mit Zirkulationsleitung verbreitet.

	Heizung	Warmwasser
Erzeugung	95% Deckungsanteil Luft-Wasser-Wärmepumpe 5% Deckungsanteil elektrischer Heizstab	95% Deckungsanteil Warmwassererzeugung über die Heizungsanlage 5% Deckungsanteil elektrischer Heizstab
Verteilung	Auslegungstemperaturen 35/28°C Dämmung der Leitungen: nach EnEV	Verteilung mit Zirkulation Dämmung der Leitungen: nach EnEV
Speicherung	Pufferspeicher - 950 Liter, Dämmung nach EnEV	/
Übergabe	Übergabekomponente Typ 1 - 50% Flächenheizung (Fußbodenheizung) Übergabekomponente Typ 2 - 50% freie Heizfläche (Heizkörper)	/

Tabelle 9: Anlagenbeschreibung der Heizung und Warmwasserbereitung (vgl. Anhang A)

Lüftungsanlage

Eine Lüftungsanlage in ein hocheffizientes und luftdichtes Gebäude zu bauen, scheint für viele ein Widerspruch. Jedoch muss ein gewisser Mindestluftwechsel gewährleistet werden. Lüftungsanlagen garantieren das. Sie dienen der Lufterneuerung, vor allem von Atemluft, dem Abtransport von Luftverunreinigungen und der Regulierung der Raumfeuchte. Die Gebäudelüftung kann auch durch freie Fensterlüftung stattfinden, jedoch stellt das ein Risiko für den Vermieter da. Am effizientesten sind Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Diese nutzen die Abwärme bzw. Kälte der verbrauchten Abluft, um frische Zuluft im Winter aufzuwärmen und im Sommer zu kühlen. (Friedrichsen, 2018)

Da es sich bei der Variante 1 um ein Sanierungsobjekt handelt, das vermietet werden soll, ist sich für eine dezentrale Lüftungsanlage entschieden worden. Damit wird sichergestellt, dass unabhängig vom Nutzerverhalten ein Mindestluftwechsel und Feuchteschutz besteht. Um die Effizienz, aber auch die Behaglichkeit zu steigern verfügt die Lüftungsanlage über einer Abluft/Zuluft-Wärmeübertrager (Wärmerückgewinnung). Die angenommene Anlage verfügt über einen Wirkungsgrad der WRG von über 80%.

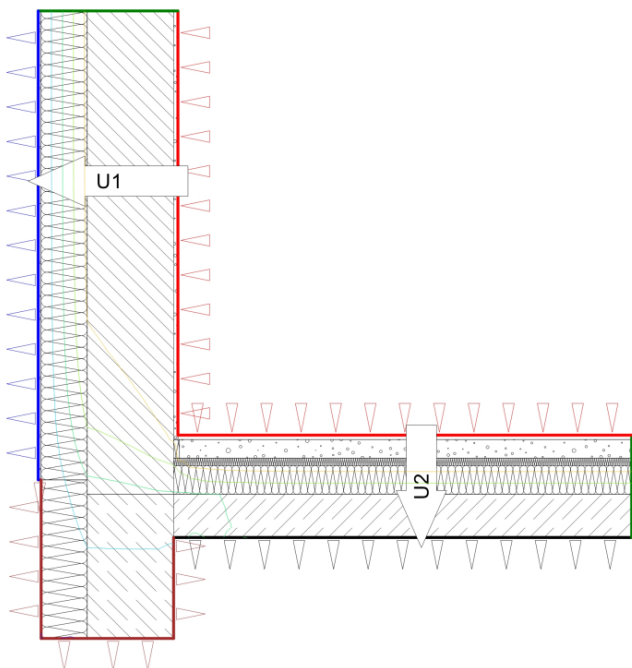
	Typ/Art	Wärmerück- gewinnung	Wärmebreitstel- lungsgrad
Beschreibung	Dezentrale Lüftungs- anlage	ja	83%

Tabelle 10: Beschreibung der Lüftungsanlage (vgl. Anhang A)

3.2.1.3. Detaillierte Wärmebrückenberechnung und Vergleich ausgewählter WB

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Wärmebrücken dargestellt. Diese zeigen Spezialfälle in der Sanierungsvariante auf.

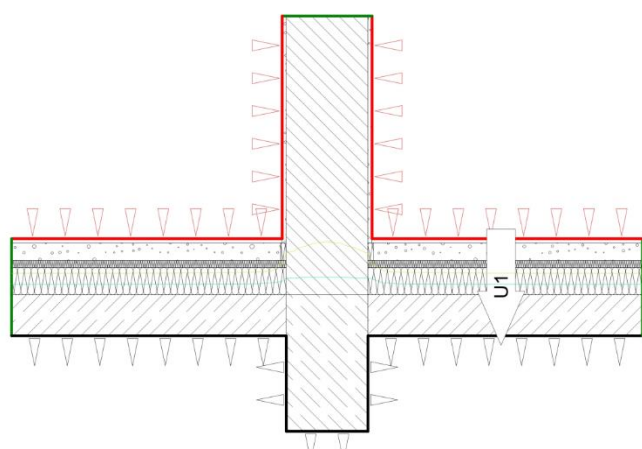
Bodenplatte an Außenwand



Die Detailzeichnung 1 „Bodenplatte an Außenwand“ zeigt die neu erstellte Bodenplatte im Erdgeschoss anschließend an das Bestandsstreifenfundament und die Außenwand. Das Fundament wurde im Sockelbereich mit XPS überdämmt. Die Außenwand mit Mineralwoll-dämmplatten. Diese Überdämmung ist vorteilhaft für die WB-Berechnung.

Es wurde ein Psi-Wert von 0,1053 W/(m K) berechnet. (vgl. Anhang D)

Bodenplatte an Hausinnenwand

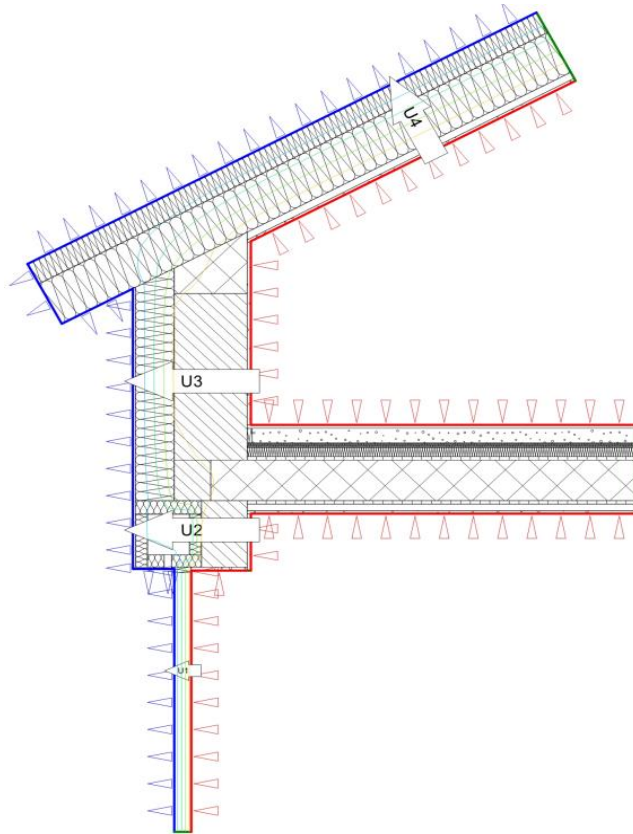


Die Detailzeichnung 25 „Bodenplatte an Hausinnenwand“ zeigt die neu erstellte Bodenplatte im Erdgeschoss anschließend an das Bestandsstreifenfundament und Bestandsinnenwand. Durch die hohen Lamda-Werte und direktem Kontakt der Bestandsmaterialien, entsteht hier eine bedeutungsvolle

Wärmebrücke. Diese gilt es, bestmöglich zu verbessern, um Bauschäden zu vermeiden. Das gelingt vor allem durch den Bodenaufbau.

Es wurde ein Psi-Wert von 0,2234 W/(m K) berechnet. (vgl. Anhang D)

Traufe an Fenstersturz mit Rollo



Die Detailzeichnung 20 „Traufe an Fenstersturz mit Rollo“ zeigt das neu errichtete Satteldach, verbunden mit dem gedämmten Bestandsmauerwerk. Die Holzbalkendecke liegt auf dem Bestandsmauerwerk auf. Darunter befindet sich der Rollokasten mit Geschossfenster. Der Rollokasten besitzt den gleichen U-Wert wie die Außenwand. Durch die lückenlose Dämmung vom Satteldach bis hin zum Rollokasten, können Wärmebrücken im Sanierungsfall vermieden werden. Es wurde ein Psi-Wert von 0,0443 $W/(m K)$ berechnet. (vgl. Anhang D)

3.2.2. Variante 2: Neubau Ziegelhaus zum KfW 55 Effizienzhaus

Bei der Variante 2 handelt es sich um ein Gebäude, das bis auf die Bauteilaufbauten identisch zum Sanierungsgebäude aus 1942 ist. Es soll für das Ziegelhaus eine energetische Maßnahmenplanung durchgeführt werden.

3.2.2.1. Gebäudehülle

	U-Wert [W/m ² K]
Bodenplatte	0,19
Außenwand gegen Außenluft	0,21
Außenwand gegen unbeheizte Garage	0,21
Geschossfenster	0,75
Dachfenster	1,00
Hauseingangstür	0,85
Nebeneingangstür	1,00
Geschossdecke/Dach	0,14

Tabelle 11: Auflistung der U-Werte der Variante 2

Dämmung der Bodenplatte (Gründung)

Die Gründung hat eine bedeutende Aufgabe in der Statik des Gebäudes. Sie sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Bauwerklasten auf den Untergrund. Bei der Variante 2 wird eine Flachgründung mit 250mm Stahlbeton verbaut. Darunter wird zur Dämmung eine druckbeständige Perimeterdämmung verlegt. Dafür werden extrudierte Polystyrol-Hartschaumplatten (XPS) mit einem Lambda-Wert von 0,038 W/(mK) und einer Stärke von 100mm verwendet. Zur weiteren Isolierung wird 60mm Expandiertes Polystyrol (EPS) mit einem Lambda-Wert von 0,035 W/(mK) verlegt. Darüber wird wiederum eine Trittschalldämmung mit 25mm mit integrierter Schlauchführung für die Fußbodenheizung gelegt. Ein Flüssigestrich als Ausgleichschicht mit 65mm wird eingebracht. Diese ebene Schicht dient als Grundlage für den eigentlichen Bodenbelag.

Durch den neuen Aufbau der Bodenplatte wird ein U-Wert von 0,19 W/(m²K) erreicht.

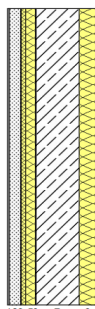
Bauteil:		Bodenplatte gegen Erdreich				Fläche : 122,00 m ²	
	Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand	
			cm	W/(mK)	kg/m ³	m ² K/W	
	1	Bodenbelag	1,00	1,300	2300,0	0,01	
	2	Estrich	6,50	1,400	2000,0	0,05	
	3	Estrichfolie	0,02	0,170	1390,0	0,00	
	4	Trittschalldämmung	2,50	0,045	260,0	0,56	
	5	EPS - WLS 035	6,00	0,035	30,0	1,71	
	6	Abdichtung	0,09	0,230	1050,0	0,00	
	7	Stahlbetonbodenplatte	25,00	2,500	2400,0	0,10	
8	XPS - WLS 038	10,00	0,038	25,0	2,63		
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 0,90			R = 5,06	
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust		wirksame Wärmespeicherfähigkeit		
122,00 m ²	23,3 %	765,0 kg/m ²	23,32 W/K	21,2 %	10cm-Regel : 5074 Wh/K 3cm-Regel : 2010 Wh/K	R _{si} = 0,17 R _{se} = 0,00 U - Wert 0,19 W/m²K	

Tabelle 12: Aufbau Bodenplatte der Variante 2 (vgl. Anhang B)

Außenwand

Die Variante 2 stellt eine einschalige Bauweise dar. Dabei werden massive einschalige Mauerwerkswände aneinandergesetzt und beidseitig verputzt. Der hier verwendete Ziegel mit 365mm besitzt einen Lambda-Wert von 0,08 W/(mK). Dieser ist ein Planziegel und nicht mit Perlit oder sonstigen Dämmstoffen gefüllt. Der U-Wert der monolithischen Außenwände ist 0,21 W/(m²K). Dies gilt sowohl für die Außenwand gegen Außenluft als auch die Außenwand gegen die unbeheizte Garage.

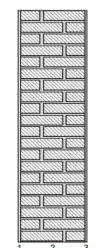
Bauteil:		Außenwand Norden Außenwand Osten Außenwand Süden Außenwand Westen				Fläche / Ausrichtung :		64,10 m ² N 37,80 m ² O 57,10 m ² S 27,00 m ² W		
	Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand				
			cm	W/(mK)	kg/m ³	m ² K/W				
	1	Innenputz	1,50	0,700	1400,0	0,02				
	2	Mauerwerk	36,50	0,080	900,0	4,56				
	3	Systemputz	1,00	0,560	1000,0	0,02				
	Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 1,20			R = 4,60			
	Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust		wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,13 R _{se} = 0,04 U - Wert 0,21 W/m²K		
	186,00 m ²	35,5 %	359,5 kg/m ²	38,98 W/K	35,5 %	10cm-Regel : 1085 Wh/K 3cm-Regel : 1085 Wh/K				

Tabelle 13: Aufbau Außenwand der Variante 2 (vgl. Anhang B)

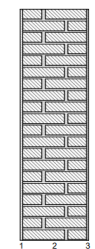
Bauteil:		Außenwand gegen unbeheizte Garage				Fläche / Ausrichtung :		20,80 m ² W		
	Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand				
			cm	W/(mK)	kg/m ³	m ² K/W				
	1	Innenputz	1,50	0,700	1400,0	0,02				
	2	Mauerwerk	36,50	0,080	900,0	4,56				
	3	Systemputz	1,00	0,560	1000,0	0,02				
	Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 1,20			R = 4,60			
	Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust		wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,13 R _{se} = 0,13 U - Wert 0,21 W/m²K		
	20,80 m ²	4,0 %	359,5 kg/m ²	4,28 W/K	3,9 %	10cm-Regel : 121 Wh/K 3cm-Regel : 121 Wh/K				

Tabelle 14: Aufbau Außenwand gegen unbeheizte Garage der Variante 2 (vgl. Anhang B)

Fenster

Die Fenster der drei Varianten werden identisch ausgeführt (vgl. Kapitel 3.2.1.1.).

Es werden Geschossfenster mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,75 W/(m²K) eingebaut. Als Dachflächenfenster wird ebenfalls eine Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von 1,00 W/(m²K) montiert.

Dachdämmung

Der Aufbau des Dachs ist identisch mit der Variante 1 (vgl. Kapitel 3.2.1.1.).

Bauteil:		Satteldachfläche Norden		Satteldachfläche Süden		Fläche / Ausrichtung :		77,76 m²	N
								79,52 m²	S
Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand				
		cm	W/(mK)	kg/m³	m²K/W				
1	Gipskartonplatten	1,25	0,250	900,0	0,05				
2	Luftschicht/Installationsebene	3,00	0,250	1,0	0,12				
3	Dampfbremse	0,02	0,300	1100,0	0,00				
4	Sparren Mineralwolle - WLS 035	20,00	0,130 0,035	500,0 260,0	1,54 5,71				
5	Holzfaserdämmung - WLS 046	10,00	0,046	290,0	2,17				
6	Diffusionsoffene Dachauflegebahn	0,05	1,000	100,0	0,00				
7	Luftschicht	4,00	-	1,0	---				
8	Lattung	3,00	-	500,0	---				
9	Dachziegelsteine	4,00	-	2000,0	---				
Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Abschnitte (siehe Skizze)							R _{1,A} = 3,88 R _{2,B} = 8,06		
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!					R_{m,zul} = 1,0		R_m = 6,72		
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,10 R _{se} = 0,10			
157,27 m²	30,0 %	194,6 kg/m²	22,73 W/K	21,3 %	10cm-Regel :	798 Wh/K	U - Wert 0,14 W/m²K		
					3cm-Regel :	492 Wh/K			

Tabelle 15: Aufbau Satteldach der Variante 2 (vgl. Anhang B)

3.2.2.2. Anlagentechnik

Heizung und Warmwasser

Die Heizung und Warmwasserbereitung ist identisch mit der Anlagentechnik der Variante 1 (vgl. Kapitel 3.2.1.2.).

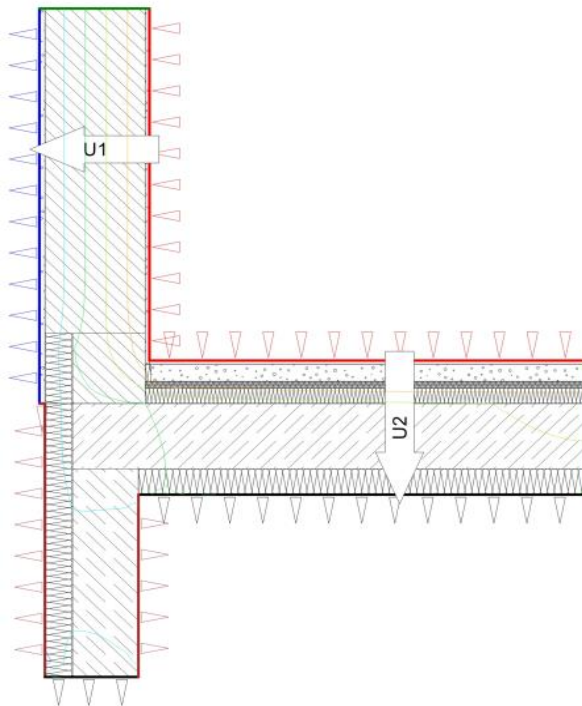
Lüftungsanlage

Die Lüftungsanlage ist identisch mit der Anlage der Variante 1 (vgl. Kapitel 3.2.1.2.).

3.2.2.3. Detaillierte Wärmebrückenberechnung

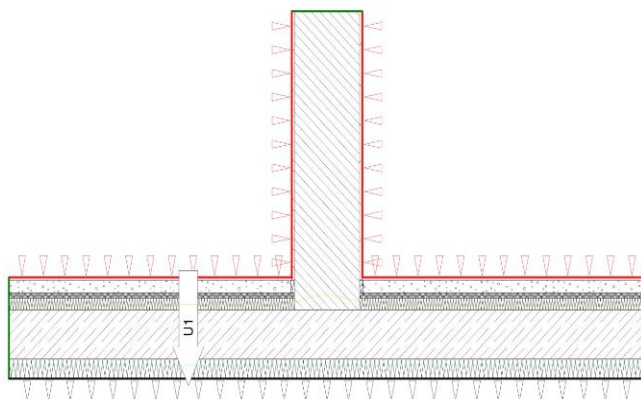
Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Wärmebrücken dargestellt. Diese zeigen ausgewählte Details der Variante 2 auf.

Bodenplatte an Außenwand



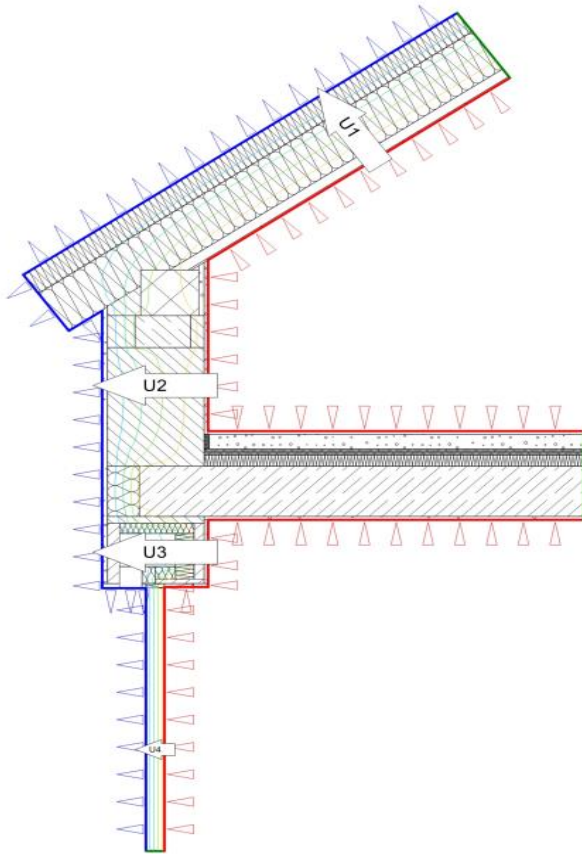
Die Detailzeichnung 1 „Bodenplatte an Außenwand“ zeigt die monolithische Außenwand an die Bodenplatte. Es fällt auf, dass der Sockelbereich mit XPS zum Feuchte-/Wärmeschutz überdämmt ist. Dies verbessert die Wärmebrücke merklich, da die Auflagefläche von Betonbodenplatte und Ziegelwand kleiner wird. Gleichzeitig wird die Frostschürze aus Stahlbeton außenseitig mit XPS-Dämmung versehen. Ebenso wird die Stahlbetonbodenplatte an der Unterseite überdämmt. Es wurde ein Psi-Wert von 0,0301 W/(m K) berechnet. (vgl. Anhang E)

Bodenplatte an Hausinnenwand



Die Detailzeichnung 25 „Bodenplatte an Hausinnenwand“ zeigt eine Ziegelinnenwand anschließend an die vollflächig gedämmte Stahlbetonbodenplatte. Diese vollflächige Dämmung verhindert das Auskühlen der gesamten Bodenplatte und des Mauerwerks. Es wurde ein fast vernachlässigbarer Psi-Wert von -0,0006 W/(m K) berechnet. (vgl. Anhang E)

Traufe an Fenstersturz mit Rollo



Die Detailzeichnung 20 „Traufe an Fenstersturz mit Rollo“ zeigt das Satteldach verbunden mit dem Mauerwerk. Die Dachkonstruktion liegt auf der Fußfette auf. Diese wiederum auf dem Ringanker aus Stahlbeton. Dieser wurde, um die WB zu verbessern, mit Ziegeln umschlossen. Des Weiteren liegt die Stahlbetondecke auf der Außenwand auf und muss mit einer Dämmschicht geschützt werden. Darunter liegt der Rollokasten mit Geschossfenster. Der Rollokasten besitzt den gleichen U-Wert wie die Außenwand. Es wurde ein Psi-Wert von $0,2453 \text{ W}/(\text{m K})$ berechnet. (vgl. Anhang E)

3.2.3. Variante 3: Neubau Holzmassivhaus zum KfW 55 Effizienzhaus

Bei der Variante 3 handelt es sich um ein Gebäude, das bis auf die Bauteilaufbauten identisch zum Sanierungsgebäude aus 1942 ist. Es soll für das Holzhaus eine energetische Maßnahmenplanung durchgeführt werden.

3.2.3.1. Gebäudehülle

	U-Wert [W/m²K]
Bodenplatte	0,19
Außenwand gegen Außenluft	0,21
Außenwand gegen unbeheizte Garage	0,32
Geschossfenster	0,75
Dachfenster	1,00
Hauseingangstür	0,85
Nebeneingangstür	1,00
Geschossdecke/Dach	0,14

Tabelle 16: Auflistung der U-Werte der Variante 3

Dämmung der Bodenplatte

Die Bodenplatte des Holzmassivgebäudes wird identisch zur Gründung der Variante 2 ausgeführt. (vgl. Kapitel 3.2.2.1.)

Bauteil:		Bodenplatte gegen Erdreich				Fläche : 122,00 m²	
	Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand	
			cm	W/(mK)	kg/m³	m²KW	
	1	Bodenbelag	1,00	1,300	2300,0	0,01	
	2	Estrich	6,50	1,400	2000,0	0,05	
	3	Estrichfolie	0,02	0,170	1390,0	0,00	
	4	Trittschalldämmung	2,50	0,045	260,0	0,56	
	5	EPS - WLS 035	6,00	0,035	30,0	1,71	
	6	Abdichtung	0,09	0,230	1050,0	0,00	
	7	Stahlbetonbodenplatte	25,00	2,500	2400,0	0,10	
8	XPS - WLS 038	10,00	0,038	25,0	2,63		
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!			R_{zul} = 0,90			R = 5,06	
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust		wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,17
122,00 m²		23,3 %	765,0 kg/m²	23,32 W/K	21,2 %	10cm-Regel : 5074 Wh/K 3cm-Regel : 2010 Wh/K	R _{se} = 0,00
							U - Wert 0,19 W/m²K

Tabelle 17: Aufbau Bodenplatte der Variante 3 (vgl. Anhang C)

Fassadendämmung

Bei der Variante 3 handelt es sich um ein Holzmassivhaus mit einem typischen Wand-aufbau einer naheliegenden Zimmerei (vgl. Tabelle 18). Im grundlegenden besteht die Wand aus einer 100mm starken Massivholzwand aus Fichtenholz. Dabei handelt es sich um CLT (Cross Laminated Timber). Dieses Material besteht aus 3,5 oder 7 Schichten Fichtenholzlamellen, die kreuzweise übereinandergelegt und flächig verleimt werden. Diese wird innenseitig mit einer Gipskartonplatte verkleidet, welche als Putzträger dient. Auf die Holzmassivwand wird zum Schutz der Dämmung eine Dampfbremse aufgebracht. Darauf wird ein Gefach installiert, das aus 160mm Starken Holzriegeln besteht, die mit Holzweichfaser – WLS 040 ausgedämmt werden. Überdämmt wird besagte Konstruktion mit 60mm Holzweichfaserdämmung – WLS 050, welche wiederum als Putzträger dient. Durch die energetische Maßnahmenplanung wird ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,18 W/(m²K) für die Außenwand erreicht.

Bauteil:		Außenwand Norden		Außenwand Osten		Außenwand Süden		Außenwand Westen		Fläche / Ausrichtung :		64,10 m² N		37,80 m² O		57,10 m² S		27,00 m² W	
Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand														
		cm	W/(mK)	kg/m³	m²KW														
1	Gipskartonplatten	1,25	0,250	900,0	0,05														
2	Holzmassivwand	10,00	0,130	500,0	0,77														
3	Winddichtung (Dampfbremse)	0,025	1,000	188,0	0,00														
Gefach - Stützen- / Balkenbreite: 8,0 cm; Zwischenraum (Füllung): 60,0 cm																			
4	Holzriegelkonstruktion	12,00	0,130	500,0	0,92														
	Holzweichfaser - WLS 040		0,040	290,0	3,00														
5	Holzfaserdämmung - WLS 050	6,00	0,050	290,0	1,20														
6	Systemputz	1,25	0,560	900,0	0,02														
Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Abschnitte (siehe Skizze)												R _{1,A} = 2,96		R _{1,B} = 5,04					
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!										R_{m,zul} = 1,0		R_m = 4,54							
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse		spezif. Transmissionswärmeverlust		wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,13											
186,00 m²	35,5 %	127,7 kg/m²	39,50 W/K	35,4 %	10cm-Regel : 4198 Wh/K	3cm-Regel : 1305 Wh/K	R _{se} = 0,04												
									U - Wert		0,21 W/m²K								

Tabelle 18: Aufbau Außenwand der Variante 3 (vgl. Anhang C)

Im Unterschied zur Außenwand hat die Außenwand gegen die unbeheizte Garage einen abgeänderten Aufbau. Die Holzmassivwand wird nur von einem 60mm starken Gefach aus Holzriegeln und Holzweichfaser gedämmt. Diese wird weiter mit 40mm Holzweichfaserdämmung bedeckt. Dies liegt an den geänderten Wärmeübergangswiderständen.

Bauteil:		Außenwand gegen unbeheizte Garage			Fläche / Ausrichtung :		20,80 m ²	W
	Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand		
			cm	W/(mK)	kg/m ³	m ² K/W		
	1	Gipskartonplatten	1,25	0,250	900,0	0,05		
	2	Holzmassivwand	10,00	0,130	500,0	0,77		
	3	Winddichtung (Dampfbremse)	0,025	1,000	188,0	0,00		
	4	Gefach - Stützen- / Balkenbreite: 8,0 cm; Zwischenraum (Füllung): 60,0 cm						
		Holzriegelkonstruktion	6,00	0,130	500,0	0,46		
		Holzweichfaser - WLS 040		0,040	290,0	1,50		
	5	Holzfaserdämmung - WLS 050	4,00	0,050	290,0	0,80		
	6	Systemputz	1,25	0,560	900,0	0,02		
Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Abschnitte (siehe Skizze)							R _{s,A} = 2,10	
							R _{s,B} = 3,14	
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!						R_{m,zul} = 1,0	R_m = 2,90	
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,13		
20,80 m ²	4,0 %	103,0 kg/m ²	6,58 W/K	5,9 %	10cm-Regel : 469 Wh/K	R _{se} = 0,13		
						3cm-Regel : 146 Wh/K	U - Wert	
							0,32 W/m²K	

Tabelle 19: Aufbau Außenwand gegen unbeheizte Garage der Variante 3 (vgl. Anhang C)

Fenster

Die Fenster der drei Varianten werden identisch ausgeführt (vgl. Kapitel 3.2.1.1.).

Es werden Geschossfenster mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,75 W/(m²K) eingebaut. Als Dachflächenfenster wird ebenfalls eine Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von 1,00 W/(m²K) montiert.

Dachdämmung

Der Aufbau des Dachs ist identisch mit dem der Variante 1 (vgl. Kapitel 3.2.1.1.).

Bauteil:		Satteldachfläche Norden			Satteldachfläche Süden		Fläche / Ausrichtung :		77,76 m ²	N
	Nr.	Baustoff	Dicke	Lambda	Dichte	Wärmedurchlasswiderstand				
			cm	W/(mK)	kg/m ³	m ² K/W				
	1	Gipskartonplatten	1,25	0,250	900,0	0,05				
	2	Luftschicht/Installationsebene	3,00	0,250	1,0	0,12				
	3	Dampfbremse	0,02	0,300	1100,0	0,00				
	4	Gefach - Stützen- / Balkenbreite: 12,0 cm; Zwischenraum (Füllung): 70,0 cm								
		Sparren	20,00	0,130	500,0	1,54				
		Mineralwolle - WLS 035		0,035	260,0	5,71				
	5	Holzfaserdämmung - WLS 046	10,00	0,046	290,0	2,17				
	6	Diffusionsoffene Dachauflegebahn	0,05	1,000	100,0	0,00				
7	Luftschicht	4,00	-	1,0	---					
8	Lattung	3,00	-	500,0	---					
9	Dachziegelsteine	4,00	-	2000,0	---					
Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Abschnitte (siehe Skizze)							R _{s,A} = 3,88			
							R _{s,B} = 8,06			
Anforderung nach DIN 4108 Teil 2 ist erfüllt!						R_{m,zul} = 1,0	R_m = 6,72			
Bauteilfläche		spezif. Bauteilmasse	spezif. Transmissionswärmeverlust	wirksame Wärmespeicherfähigkeit		R _{si} = 0,10				
157,27 m ²	30,0 %	194,6 kg/m ²	22,73 W/K	21,3 %	10cm-Regel : 798 Wh/K	R _{se} = 0,10				
						3cm-Regel : 492 Wh/K	U - Wert			
							0,14 W/m²K			

Tabelle 20: Aufbau Satteldach der Variante 3 (vgl. Anhang C)

3.2.3.2. Anlagentechnik

Heizung und Warmwasser

Die Heizung und Warmwasserbereitung ist identisch mit der Anlagentechnik der Variante 1 (vgl. Kapitel 3.2.1.2.).

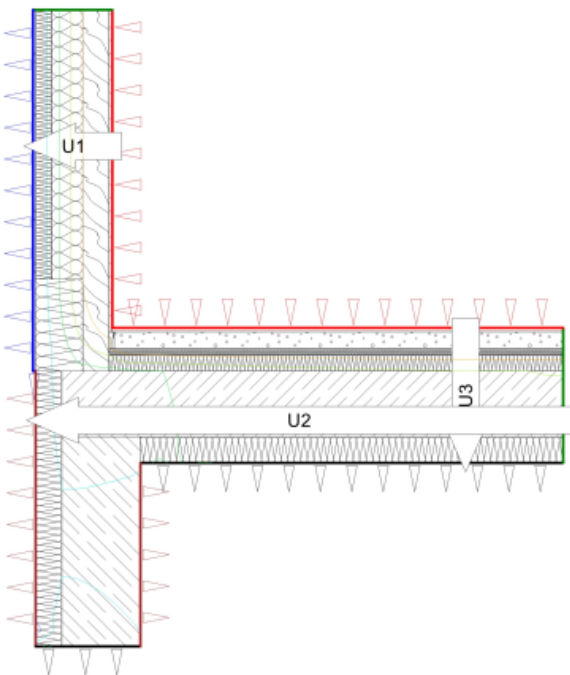
Lüftungsanlage

Die Lüftungsanlage ist identisch mit der Anlage der Variante 1 (vgl. Kapitel 3.2.1.2.).

3.2.3.3. Detaillierte Wärmebrückenberechnung

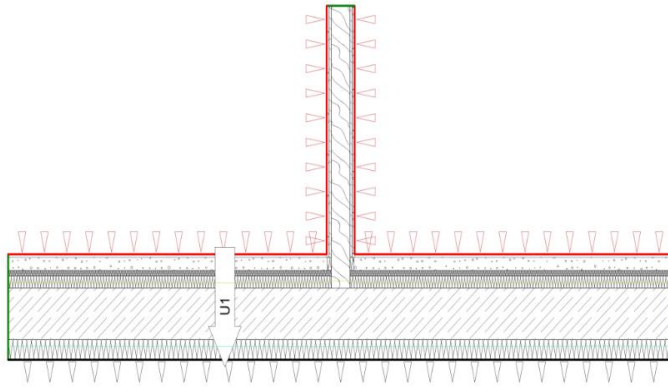
Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Wärmebrücken dargestellt. Diese zeigen Details der Variante 3 auf.

Bodenplatte an Außenwand



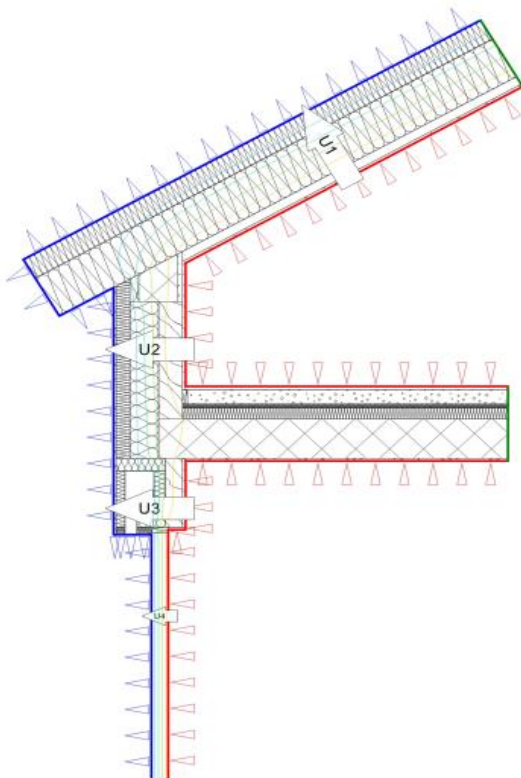
Die Detailzeichnung 1 „Bodenplatte an Außenwand“ zeigt die Holzmassivwand mit Holzfaserdämmung an die Bodenplatte. Der Sockelbereich ist mit XPS-Dämmung zum Feuchte-/ Wärmeschutz überdämmt. Gleichzeitig wird die Frostschürze aus Stahlbeton mit XPS-Dämmung überdämmt. Ebenso wird die Bodenplatte mit XPS versehen. Die Auflagefläche der eigentlichen Konstruktion aus Massivholz besitzt nur eine geringe Auflagefläche. Es wurde ein Psi-Wert von $0,0957 \text{ W}/(\text{m K})$ berechnet. (vgl. Anhang F)

Bodenplatte an Hausinnenwand



Die Detailzeichnung 25 „Bodenplatte an Hausinnenwand“ zeigt eine Massivholzwand anschließend an die vollflächig gedämmte Stahlbetonbodenplatte. Diese vollflächige Dämmung verhindert das Auskühlen der gesamten Bodenplatte und der Innenwände. Auffällig ist die schmale Ausführung der Innenwände, wodurch weniger Auflagefläche zwischen Stahlbeton und Holz herrscht. Es wurde ein unbedeutender Psi-Wert von $0,0063 \text{ W}/(\text{m K})$ berechnet. (vgl. Anhang F)

Traufe an Außenwand



Die Detailzeichnung 20 „Traufe an Fenstersturz mit Rollo“ zeigt das Satteldach verbunden mit der Massivholzwand. Die Dachkonstruktion liegt auf der Fußfette auf. Diese sind wiederum auf der Außenwandkonstruktion. Des Weiteren liegt die Holzmassivdecke auf der Außenwand auf und muss mit einer Dämmschicht geschützt werden. Darunter liegt der Rollokasten mit Geschossfenster. Der Rollokasten besitzt den gleichen U-Wert wie die Außenwand. Durch die lückenlose Dämmung von Satteldach bis hin zum Rollokasten, können Wärmebrücken bei Holzmassivwänden vermieden werden. Es wurde ein Psi-Wert von $0,0728 \text{ W}/(\text{m K})$ berechnet. (vgl. Anhang F)

3.3. Vergleich der Varianten

Ziel der Energetischen Maßnahmenplanung war es, eine bestmögliche Vergleichbarkeit zwischen den Varianten herzustellen, um die Fragestellung optimal zu beantworten. Die drei Gebäude wurden dafür als KfW EH 55 geplant. Eine detaillierte Wärmebrückenberechnung wurde durchgeführt, um die Varianten auf eine gleiche Stufe hinsichtlich H^T und Primärenergiebedarf zu planen. Deshalb kann sichergestellt werden, dass die Gebäude vergleichbar sind. Dadurch können im Anschluss die verwendeten Materialien pro Variante untersucht und gleichzeitig die Betriebsphase ausgelassen werden.

3.3.1. Maßnahmen an der Gebäudehülle und Anlagentechnik

Transmissionswärmeverlust H^T und Primärenergiebedarf sollten komparabel sein und eine maximale Abweichung von 5% haben (vgl. Tabelle 21). Dafür wurde ein iterativer Prozess angewandt, da der GEG-Nachweis zum einen aus der Planung von Bauteilaufbauten (vgl. Anhang A-C), zum anderen aus einem Wärmebrückennachweis besteht (vgl. Anhang D-F). Diese beeinflussen sich gegenseitig und somit auch die zwei Vergleichsgrößen.

Als Ausgangssituation wurde das nach KfW 55 geplante Sanierungsobjekt (Variante 1) genommen. Anschließend wurden die Variante 2 und 3 daran angepasst. Die Anlagentechnik ist in allen drei Varianten gleichartig (vgl. Tabelle 22).

	Transmissionswärmeverlust H^T in W/m^2K	Primärenergiebedarf in kWh/m^2a
Variante 1: Sanierung	0,23	30,38
Variante 2: Ziegel-Neubau	0,23	30,56
Variante 3: Holz-Neubau	0,22	29,77

Tabelle 21: Auflistung der Vergleichsgrößen

	Variante 1 Sanierung	Variante 2 Ziegelbau	Variante 3 Holzbau
Bodenplatte	Bodenbelag; 65mm Estrich; 25mm Trittschall- dämmung; 100mm PUR; 150mm Stahlbeton- bodenplatte	Bodenbelag; 65mm Estrich; 25mm Trittschalldämmung; 60mm EPS; 250mm Stahlbetonbodenplatte; 100mm XPS-Dämmung	
Außenwand gegen Außenluft	300mm Bestands- mauerwerk; 160mm Mineralwoll- dämmung	365mm Mauerwerk	100mm Holzmassiv; 120mm Konstruktio- nsholz / Holz- weichfaser; 60mm Holzfaser- dämmplatten
Außenwand gegen unbeheizte Garage	300mm Bestands- mauerwerk; 100mm Mineralwoll- dämmung	365mm Mauerwerk	100mm Holzmassiv; 60mm Konstruktio- nsholz / Holz- weichfaser; 40mm Holzfaser- dämmplatten
Geschossfenster	Wärmeschutzverglasung mit U-Wert von 0,75 W/m ² K		
Dachfenster	Wärmeschutzverglasung mit U-Wert von 1,00 W/m ² K		
Hauseingangstür	Tür mit U-Wert von 0,85 W/m ² K		
Nebeneingangstür	Tür mit U-Wert von 1,00 W/m ² K		
Satteldach	200mm Sparren/Mineralwolle + 100mm Holzfaserdämmplatten		
Anlagentechnik + Lüftungsanlage	Luft-Wasser-Wärmepumpe Dezentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung		

Tabelle 22: Energetisch bedeutsame Schichten der Bauteilaufbauten der drei Varianten im Vergleich; Identische Aufbauten sind in blau markiert

3.3.2. Vergleich ausgewählter Wärmebrücken

Wie schon erwähnt, war die Aufgabe der detaillierten Wärmebrückenberechnung im GEG-Nachweis genaue Werte für den Transmissionswärmeverlust H^T und Primärenergiebedarf jedes Gebäudes zu bekommen. Dafür wurde für jede Variante ein Wärmebrückenzuschlag berechnet und in die Berechnung mit einfließen lassen (vgl. Tabelle 13).

Der Vergleich soll vor allem die Unterschiede von WB in Sanierungs-/ Ziegel- und Holzmassivbauten zeigen. Da die Kubatur der Gebäude gleich ist, ergeben sich auch jeweils 25 ähnliche Wärmebrücken (vgl. Anhang D - F). Diese sehen jedoch in jeder Variante unterschiedlich aus. Die Unterschiede sollen anhand von drei ausgewählten WB aufgezeigt werden.

Wärmebrücke 01 „Bodenplatte an Außenwand“

Das Sanierungsobjekt besitzt ein Bestands-Mauerwerk mit Außenwanddämmung. Darüber hinaus gibt es ein Bestands-Streifenfundament und eine neu eingebrachte Bodenplatte. Das Streifenfundament wurde außenseitig überdämmt. Die Dämmschicht konnte aber nicht unter der Außenwand weitergezogen werden. Dies führt zu einem unausgewogenen Verhältnis der Flächen von einer Wärme zuführenden Innenseite und der Wärme abführenden Außenseite. Es entsteht ein „Kühlrippeneffekt“, der gesenkte Innenwandoberflächentemperaturen und eine massive Verschlechterung des Psi-Werts mit sich bringt. Dagegen ist die Stahlbetonbodenplatte der Neubauten größtenteils thermisch vom Untergrund durch eine Perimeterdämmung getrennt und somit ist auch der Wärmestrom abgekoppelt. Im Gegensatz zum Sanierungsgebäude besitzen die zwei Neubauten zwar kein Streifenfundament, jedoch eine Frostschräge. Diese wirkt ebenso als „Kühlrippe“.

	Variante 1: Sanierung	Variante 2: Ziegel-Neubau	Variante 3: Holz-Neubau
Wärmebrücke 01	0,1053 W/(m K)	0,0301 W/(m K)	0,0957 W/(m K)

Tabelle 23: Vergleich der Psi-Werte der drei Gebäudevarianten

Wärmebrücke 20 „Traufe an Fenstersturz mit Rollo“

Alle Varianten besitzen dieselbe Dachkonstruktion. Weiter werden in allen Varianten Verschattungsvorrichtungen (Rollo) eingebaut. Diese stellen eine Schwachstelle in der Gebäudehülle dar. Dies ergibt sich aus der Schwächung der Dämmebene, die bei allen Rollladenkästen entsteht. Bei der WB 20 ist auffällig, dass die Variante 2 (Ziegel-Neubau) den höchsten Psi-Wert im direkten Vergleich besitzt (vgl. Tabelle 26). Sie besitzt einen vorgefertigten Ziegel-Rollladenkasten, der anstatt eines Ziegels verbaut wird. Bei Variante 1 und 3 wird ein gedämmter Rollladenkasten verbaut, mit dem Unterschied das Innenseitig eine Mauerwerks- bzw. Holzmassivlage vorgesehen ist. Überdies besitzen sowohl Variante 1 und 3 Holzbalken- bzw. Holzmassivdecken. Das Ziegelhaus hat dagegen eine Stahlbetondecke. Diese wirkt als konstruktionsbedingte Wärmebrücke. Die Stahlbetondecke ragt in das Mauerwerk und schwächt es durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit. Die Holzdecken ragen ebenso in die Außenwandkonstruktion hinein, weisen jedoch eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit auf und sind dadurch weniger gewichtig.

	Variante 1: Sanierung	Variante 2: Ziegel-Neubau	Variante 3: Holz-Neubau
Wärmebrücke 20	0,0443 W/(m K)	0,2453 W/(m K)	0,0728 W/(m K)

Tabelle 24: Vergleich der Psi-Werte der drei Gebäudevarianten

Wärmebrücke 25 „Bodenplatte an Hausinnenwand“

Wie in Vergleich der Wärmebrücke 01 erwähnt, führt das nicht überdämmte Streifenfundament beim Sanierungsgebäude zu einem „Kühlrippeneffekt“. Dieser führt zu gesenkten Innenwandoberflächentemperaturen und einer massiven Verschlechterung des Psi-Werts. Im Vergleich dazu besitzen die Neubau-Varianten eine durchgehende Dämmebene unterhalb der Stahlbetonbodenplatte. Dadurch wird der energetische Einfluss der WB reduziert und ebenso der Psi-Wert.

	Variante 1: Sanierung	Variante 2: Ziegel-Neubau	Variante 3: Holz-Neubau
Wärmebrücke 25	0,2234 W/(m K)	-0,0006 W/(m K)	0,0063 W/(m K)

Tabelle 25: Vergleich der Psi-Werte der drei Gebäudevarianten

Wärmebrückenzuschläge der drei Varianten

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Wärmebrückenberechnung im Sanierungsfall entscheidend und unumgänglich ist. Das liegt an den hohen Lambda-Werten und schlechter Dämmung der Bestandsbauteile. Ein detaillierter Nachweis ist wichtig, um Dauerhaftigkeit und Schadensfreiheit zu gewährleisten. Zudem führt sie zu Energieeinsparungen.

In unserem Fallbeispiel besitzt das Gebäude der Variante 1 einen Wärmebrückenzuschlag von 12,24 W/K. Neu gebaute Ziegel Häuser sind meist nicht von gefährlichen WB betroffen. Eine detaillierte Wärmebrückenberechnung ist trotzdem sinnvoll, um geringere Dämmstärken bei gleichem Mindeststandard verbauen zu dürfen. Variante 2 besitzt einen Wärmebrückenzuschlag von 10,44 W/K. Das Holzhaus hat einen Wärmebrückenzuschlag von annähernd 2,69 W/K. Dies liegt vor allem an der tragenden Konstruktion, die aus Holz besteht und gleichzeitig auch wärmedämmende Eigenschaften besitzt.

	Variante 1: Sanierung	Variante 2: Ziegel-Neubau	Variante 3: Holz-Neubau
Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} in W/K	12,24	10,44	2,69

Tabelle 26: Vergleich der Wärmebrückenzuschläge der drei Gebäudevarianten

3.4. Ökobilanz

Ziel ist es herauszufinden, welche der drei Gebäudevarianten den kleinsten Ausstoß an CO₂-Äquivalenten (GWP) besitzt, um daraus zu schlussfolgern welches Gebäude die geringsten Umweltwirkungen hat. Dazu wurde jeweils eine Ökobilanz der drei Gebäude über den Lebenszyklus von 50 Jahren mit demselben Ziel und Untersuchungsrahmen erstellt. Dabei wurden die Module Herstellung (A1-A3), Austausch (B4) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C3-C4) bilanziert. Die Berechnungen der Ökobilanz orientieren sich an den Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude (Stand 25.06.2021) (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2021). Begonnen wurde mit einem bauteilbasierten Mengenermittlungsansatz, wobei die Materialmengen über die Bauteilflächen ermittelt wurden. Anschließend wurden sie mit den Datensätzen der ÖKOBAUDAT 2021_II_A1 (Stand 27.06.2022) verknüpft. Im Anschluss wurden die Umweltwirkungen, bezogen auf 1m² Nutzfläche, auf einen Lebenszyklus der Gebäude von 50 Jahren extrapoliert. Der Input an Ressourcen in Bezug auf das Global Warming Potential (GWP) der Varianten wurden dabei überprüft. Die Ergebnisse der drei Ökobilanzen der Gebäude werden hinterher miteinander verglichen. So kann überprüft werden, inwieweit die Hypothesen richtig sind. Die nachstehenden Normen wurden bei der Ökobilanz benutzt: DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044, DIN EN 15 978 und DIN EN15804.

3.4.1. Systemabgrenzung

Es wurde entschieden, dass die Gebäudevarianten bei der Ökobilanzierung über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Um das Verfahren zu vereinfachen, wird ein Sicherheitszuschlag von 10% von der Ökobau.dat veranschlagt (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)). Nur der Austausch von Bauteilen mit weniger als 50 Jahren Lebensdauer wird in der Nutzungsphase beachtet. Außerdem sollen Baustellenprozesse vernachlässigt werden. Die Außenanlagen, wie z.B. Balkone, Parkplätze oder Gartenwege werden von der Bilanzierung ausgeschlossen, da zu wenig Informationen vorliegen. Die Transporte von und zu der Baustelle werden vernachlässigt.

Die drei Gebäudevarianten besitzen alle dasselbe Satteldach, Geschossfenster und Haus-/Nebeneingangstür. Außerdem ist die Anlagentechnik inklusive Lüftungsanlage

ebenso identisch. Da der Unterschied der Varianten von Interesse ist, können die identischen Bauteile vernachlässigt werden. Des Weiteren wird das Modul B6 vernachlässigt, da in der Maßnahmenplanung die drei Varianten mit ähnlichen Transmissionsverlusten geplant wurden. Somit ist die Betriebsphase vergleichbar und damit vernachlässigbar.

LEBENSWEG-PHASEN	A 1-3			A 4-5		B 1-7			C 1-4				D				
	HERSTELLUNGS-PHASE			ERRICHTUNGS-PHASE		NUTZUNGSPHASE			ENDE DES ZYKLUS				LEBENS-		VORTEILE UND BELASTUNGEN AUSSERHALB DER SYSTEMGRENZE		
	ROHSTOFFBESCHAFFUNG	TRANSPORT	PRODUKTION	TRANSPORT	ERRICHTUNG / EINBAU	NUTZUNG 1	INSTANDHALTUNG 2	INSTANDESETZUNG	AUSTAUSCH 2	MODERNISIERUNG	ENERGIEVERBRAUCH IM BETRIEB	WASSERVERBRAUCH IM BETRIEB	RÜCKBAU / ABRISS	TRANSPORT	ABFALLVERWERTUNG	ENTSORGUNG	POTENTIAL FÜR WIEDERWERTUNG, RÜCKGEWINNUNG UND RECYCLING
Module gemäß DIN EN 15978	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Abbildung 26: Darstellung der Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15978 (DGNB GmbH, 2018a)

- Vergleich der Gebäudevarianten bezüglich Global Warming Potential (GWP) und total nicht-erneuerbarer Primärenergie (PENRT)
- drei unterschiedliche Gebäudevarianten Ziegelbestand, Mauerwerk, Massivholz über den Lebenszyklus von 50 Jahren
- Errechneter totaler nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf Herstellung (A1-A3), Austausch (B4) und Entsorgung (C3-C4)
- Errechneter GWP Beitrag Herstellung (A1-A3), Austausch (B4) und Entsorgung (C3-C4)
- Unterschiede der Gebäude in der Zusammensetzung der Außenwände
- Unterschiede der Gebäude in der Zusammensetzung der Innenwände
- Unterschiede der Gebäude in der Zusammensetzung der Gründung
- Unterschiede der Gebäude in der Zusammensetzung der Geschossdecken
- Kongruenz der Geschossfenster/ Hauseingangstür der Gebäude
- Kongruenz des Satteldachs der Gebäude
- Kongruenz der Anlagentechnik der Gebäude

3.4.2. Sachbilanz

- Annahme von 50 Jahren Lebensdauer für monolithische Tragkonstruktionen ohne Ersetzen der Konstruktion
- Eingabe der Materialmengen bezogen auf jeweils 1 m² Nutzfläche als Basisgröße für die Bauteilbetrachtung
- Massenermittlung der Gebäude auf Grundlage der Grundrisse der Variante 1; Variante 2 und 3 besitzen gleiche Kubatur (vgl. Anhang G-I)
- Nutzungsdauern der Bauteile wurden anhand des Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) ermittelt (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2017)
- Zusammenfassung der Phasen A1-3 (Herstellung), B4 (Austausch) und C3-4 (Entsorgung)
- Bilanzierungsweise ÖKOBAUDAT 2021_II_A1 (Stand 27.06.2022)
- Methode: DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044, DIN EN 15 978, DIN EN15804

	Fläche in m²
Streifenfundament	22,5 (Neubau) 37,5 (Sanierung)
Bodenplatte	122
Außenwände gegen Außenluft	186
Außenwände gegen unbeheizt	20,6
Tragende Innenwände	126,3
Nichttragende Innenwände	31,8
Geschossdecken	210

Tabelle 27: Auflistung der Bauteilflächen

3.4.3. Wirkungsabschätzung

Der Indikator Treibhauspotential (GWP) wird in der Wirkungsabschätzung festgestellt, interpretiert und verglichen. Definiert ist das Treibhauspotential nach Bewertungssystem Nachhaltigen Bauens wie folgt: „Das Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) ist der potenzielle Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten, d.h. zum sogenannten Treibhauseffekt. Der Beitrag des Stoffes wird als GWP Wert relativ zu dem Treibhauspotential des Stoffes Kohlendioxid (CO₂) angegeben“ (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung). Die Einheit des GWP ist kg CO₂äq..

Als weiterer Indikator zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit soll die total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT) dienen. Definiert ist diese nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen wie folgt: „Primärenergie ist die in natürlich vorkommenden Energiequellen zur Verfügung stehende Energie. Dazu zählen nicht-erneuerbare Energien wie Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran“ (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung). Die Einheit des PENRT ist MJ / (m²*a).

Weitere Indikatoren werden hier nicht ausführlich betrachtet, da diese hinsichtlich der Fragestellung nicht zweckdienlich sind.

3.4.4. Funktionelle Einheit

Da in einer Ökobilanz verschiedene Produkte und Vorgänge verglichen werden, ist es nötig, die Funktion eindeutig festzulegen und sie identisch mit ihrem Nutzen ist. Dafür wird die funktionelle Einheit eingeführt. In der vorliegenden Arbeit ist diese die Bereitstellung von 1m² Bruttogrundfläche (BGF) des Gebäudesystems über den Lebenszyklus von 50 Jahren. Die zu vergleichenden Gebäude sind in ihrer Fläche und Funktion äquivalent.

3.4.5. Auswertung

Im Unterschied zur DGNB erfolgt die Auswertung pro BGF und nicht nach der Bezugsfläche der NGF. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Unterschiede der Materialien der einzelnen Varianten zu evaluieren. Gleichzeitig erhöht sich die Vergleichbarkeit der Varianten, da Ergebnisse nicht durch unterschiedliche Wandstärken verfälscht werden.

Da das Programm eLCA aktuell nur nach der Bezugsgröße NGF arbeitet (Stand: 30.07.2022) wird bei der Lebenszyklusanalyse statt der NGF, der Wert der BGF eingefügt. Dies bedeutet, dass alle Grafiken und Werte, die auf die NGF bezogen sind, sich eigentlich auf die BGF beziehen.

Die Berechnungen erfolgen auf Gebäudeebene und werden anschließend auf 1m² BGF bezogen.

Gebäudeteil	Breite	Länge	Bruttogrundfläche
Erdgeschoss	13,400 m	9,150 m	122,610 m ²
Obergeschoss	13,400 m	9,150 m	122,610 m ²
Dachgeschoss	13,400 m	9,150 m	122,610 m ²
			Summe: 367,83 m² BGF gerundet: 368 m²

Tabelle 28: Berechnung der Bruttogrundfläche der drei Gebäudevarianten

3.4.6. Ergebnisse Ökobilanz der drei Gebäudevarianten

Ausgangspunkt für die Lebenszyklusanalyse sind die drei Gebäudevarianten aus Kapitel 3.2., der Sanierungsvariante (Variante 1), dem Ziegelvariante (Variante 2) und der Holzmassivvariante (Variante 3). Die genauen Aufbauten der Bauteile, welche immer Teil der Erklärung sind, lassen sich in Tabelle 22 finden.

Die Endergebnisse der Ökobilanzen werden zunächst über verschiedene Wirkungsindekatoren verglichen. Daraufgehend soll sich jedoch zur Beantwortung der Themenfrage auf den Indikator Treibhauspotential und der totalen nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf bezogen werden. Die Endwerte für alle Gebäudevarianten werden normiert auf die Bruttogrundfläche und ein Jahr. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der Gebäudevarianten hergestellt.

3.4.6.1. DGNB-Gewichtungsschlüssel für Umweltindikatoren

„Auch wenn die Berechnung aller sieben Indikatoren im Rahmen der Ökobilanzierung in derselben Detailtiefe erfolgt, ist es empfehlenswert, in der Kommunikation zwischen Leit- und Nebenindikatoren zu unterscheiden [...]. Leitindikatoren sind im Gegensatz zu Nebenindikatoren höher gewichtet“ (DGNB GmbH, 2018, S. 13).

G_{GWP}	G_{POCP}	G_{AP}	G_{EP}	G_{PENE}	G_{PEGES}	$G_{PENE/PEGES}$
40 %	10 %	10 %	10 %	15 %	10 %	5 %

Tabelle 29: Gewichtungsschlüssel der Umweltindikatoren zur Ermittlung der gewichteten Umweltwirkungen (DGNB GmbH, 2018a)

Leitindikatoren sind nach der DGNB das Treibhauspotential (GWP) und die nicht-erneuerbare Primärenergie. Nebenindikatoren dagegen beispielsweise POCP, AP, EP.

Dies bedeutet, dass die DGNB nach einer Ökobilanz nicht alle Indikatoren gleich behandelt, sondern nach Bedeutsamkeit gewichtet (vgl. Tabelle 29).

In der nachfolgenden Ökobilanz sollen nur die Leitindikatoren betrachtet werden, um die ökologische Nachhaltigkeit zu veranschaulichen.

3.4.6.2. Vergleich der Ergebnisse für alle Wirkungskategorien

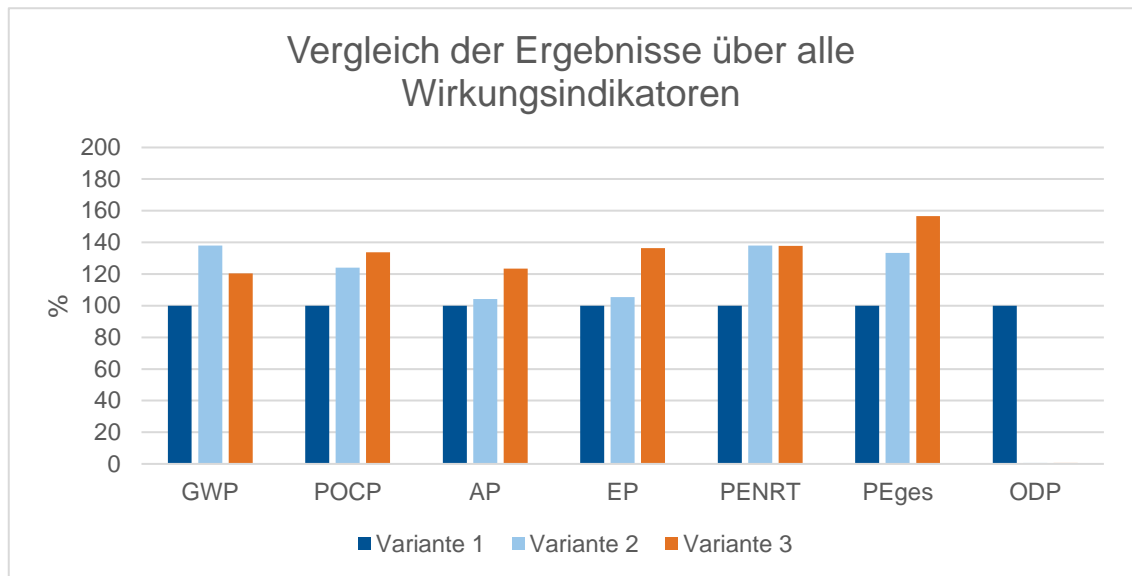


Abbildung 27: Ergebnisse aller Wirkungsindikatoren der Varianten 2 und 3 in Relation zu Variante 1 (eigene Darstellung)

Abbildung 23 stellt verschiedene Wirkungsindikatoren der unterschiedlichen Bauweisen in Bezug auf Variante 1 dar. Deshalb zeigen alle Werte der Indikatoren des Sanierungsgebäudes 100%.

Bei Variante 2 ist beim **Treibhauspotential (GWP)** ein deutlich höherer Wert zu dokumentieren. Dieser liegt genauer gesagt 36% höher als Variante 1. Das Holzmassivhaus (Variante 3) schneidet auch mit einem um 19% höheren Wert ab. Die Hintergründe der Unterschiede im GWP werden im Abschnitt 3.4.6.3 und 3.4.6.4. weiter erörtert.

Der Indikator der **photochemischen Ozonbildung (POCP)** verhält sich ähnlich zum GWP. Die Sanierungsvariante schneidet besser als die zwei Neubauvarianten ab. Zu erklären ist das durch die Bestandsmaterialien der Sanierungsvariante, die in der Modulgruppe A1-A3 mit geringeren POCP-Werten in die Berechnung mit eingeht.

Variante 1 und 2 liegen beim **Versauerungspotential (AP)** fast gleichauf (3,8% Unterschied). Bei Variante 3 errechnete sich aber ein um 22,8% schlechterer Wert. Dies liegt größtenteils am Baustoff Holz.

Der hohe Wert für das **Eutrophierungspotential (EP)** der Variante 3 ist 36% größer als die Referenz-Variante. Das liegt vor allem am Deckenaufbau. Dieser ist dem Bauteil der Variante 2, bis auf die Stahlbetondecke bzw. Massivholzdecke, sehr ähnlich. Das bedeutet, dass der Unterschied zwischen 2 und 3 aus der Wahl des Trägermaterials

herrührt. Genauer gesagt liegt es am Holz, das mehr Stickstoff und Phosphat enthält als Stahlbeton und somit ein höheres Potential zur Übersättigung des Bodens besitzt. Variante 1 erreicht wiederum einen besseren Wert, da ein Teil der hölzernen Deckenkonstruktion weiterverwendet wird und somit nicht in die Rechnung einfließt.

Der Indikator **total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)** zeigt höhere Berechnungswerte für die Neubauvarianten. Diese sind um 36% erhöht. Das Sanierungsgebäude sticht hier mit einem niedrigeren Wert hervor, da für die Produktion der Materialien weniger fossile Energieträger verwendet werden müssen. Im Gegensatz dazu muss beispielsweise das Mauerwerk der Ziegelbauvariante erst mit Gas gebrannt werden. Dies erhöht den PENRT-Wert. Dazu kommt noch der energieaufwändige Prozess der Zementherstellung mit fossilen Energieträgern, der wiederum in die Variante 2 mit dessen Betongeschossdecken hineinspielt. Die Hintergründe der Unterschiede des PENRT werden im Abschnitt 3.4.6.5. und 3.4.6.6. weiter erörtert.

Die **Primärenergie gesamt (PEges)** hat bei den Neubauvarianten einen im Vergleich zur Sanierungsvariante erhöhten Anteil. Der Ziegelneubau weist eine um 32,1% erhöhten Energiebedarf für die Konstruktion auf. Der Holzneubau eine um fast 55% erhöhten Bedarf der Konstruktion. Zu erklären ist das durch zwei Punkte. Zum einen werden die Bestandmaterialien der Sanierungsvariante in den Modulen A1-A3 nicht mit bilanziert. Dadurch wird in der Modulgruppe A1-A3 insgesamt weniger Primärenergie zur Herstellung verwendet als bei dem Massivholz- oder Ziegelneubauhaus. Zum anderen setzen die Ökobau.dat Datensätze im Allgemeinen einen hohen Anteil der regenerierbaren Energie für biogene Stoffe an. Dabei wird zum Beispiel auch Solarenergie, die zum Wachsen von Holz nötig ist, bilanziert. Deshalb schneidet in Sachen Primärenergie das Holzmassivhaus am schlechtesten ab. Genauer wird darauf in Abschnitt 3.4.6.5. eingegangen.

Auffällig ist der Wert für das **Ozonabbaupotential (ODP)**, dass nur für das Sanierungsobjekt abgebildet ist. Grund dafür ist ein Skalierungsproblem, da die ODP-Werte der anderen beiden Varianten um über 99% kleiner ausfallen und deshalb zu klein für die Grafik sind. Der hohe Wert im Vergleich zum Neubau entsteht in der Sanierungsvariante durch das Dämmmaterial PUR. Dieses wird nur in der Sanierung verwendet, um geringe Aufbauhöhen des Fußbodens zu erreichen. Die Polyurethan-Dämmplatten treiben diesen Wert vor allem durch die Herstellung stark in die Höhe.

Die Indikatoren, die von der DGNB mit Abstand am höchsten gewertet wurden, sind das Treibhauspotential (GWP) und total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT) (vgl. Tabelle 29). Diese sollen zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit in der weiteren Arbeit näher betrachtet werden.

3.4.6.3. Gesamtergebnisse der Ökobilanz des Indikators GWP

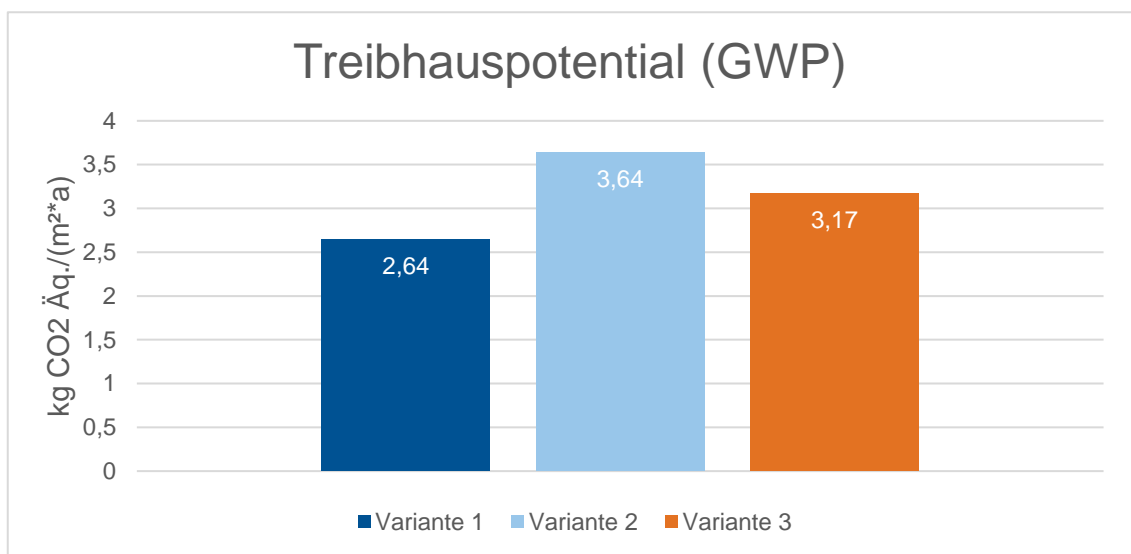


Abbildung 28: Graphische Darstellung der absoluten Werte für den maßgebenden Wirkungsin-
dikator Treibhauspotential (eigene Darstellung)

Das Treibhauspotential ist, wie oben genannt, ausschlaggebend zur Beantwortung der Forschungsfrage. In Abbildung 28 sind die absoluten Werte des GWP über den gesamten Lebenszyklus graphisch dargestellt. Man erkennt, dass Variante 2 mit 3,64 kg CO₂ Äq./ (m²*a) die höchsten Emissionen besitzt. Am besten schneidet das Sanierungsgebäude mit 2,64kg CO₂ Äq./ (m²*a) ab. Gefolgt vom Holzmassivhaus mit 3,17kg CO₂ Äq./ (m²*a).

Die Ergebnisse der Ökobilanz des GWP werden im folgenden Kapitel nach Bauteilgruppen näher beleuchtet.

3.4.6.4. Ergebnisse der Ökobilanz des Indikators GWP differenziert nach Bauteilgruppen

Abbildung 29 zeigt das Treibhauspotential (GWP) verteilt auf die Bauteilgruppen.

Den größten Anteil am GWP über alle Bauteile haben die Decken. Diese besitzen die größte Bauteilfläche mit 210 m² und zeigen deshalb einen sehr hohen Wert. Im Gegensatz dazu besitzt die Bodenplatte nur eine Fläche von 122 m² und erhält, im Falle der Variante 2, einen um nur 34% geringeren Wert. Daraus folgt, dass die Bodenplatte unter allen Bauteilen die höchsten spezifischen Emissionen hat und so den größten Beitrag zum Treibhauspotential. Die Deckenkonstruktion ist bei allen Varianten verschieden geplant, was zu Abweichungen führt, die im Anschluss erklärt werden. Gleiches gilt für die Gründung, zu der Fundamente und Bodenplatte zählen.

Die Außen- und Innenwände sind wegen der Materialunterschiede der Varianten ausschlaggebend für das Ergebnis des Treibhauspotentials. Hätten die Gebäude mehr als zwei Geschosse, wären die Außen- und Innenwände und auch die Geschossdecken anteilmäßig noch höher. Die Endergebnisse der Bauteile in der Ökobilanz wären dann ebenso maßgeblicher bei der ökologischen Beurteilung der Gebäudevarianten.

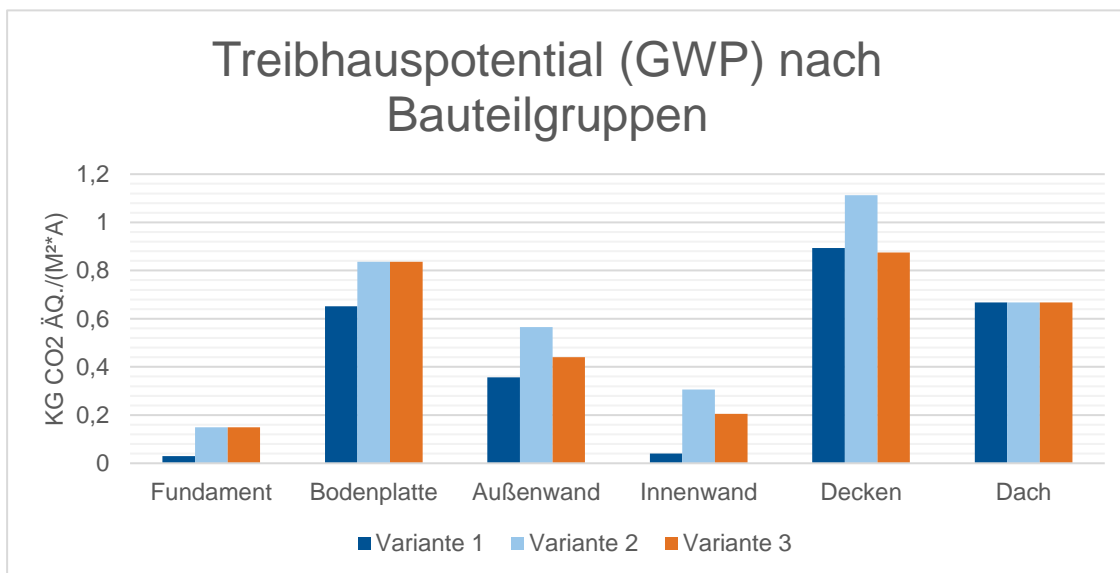


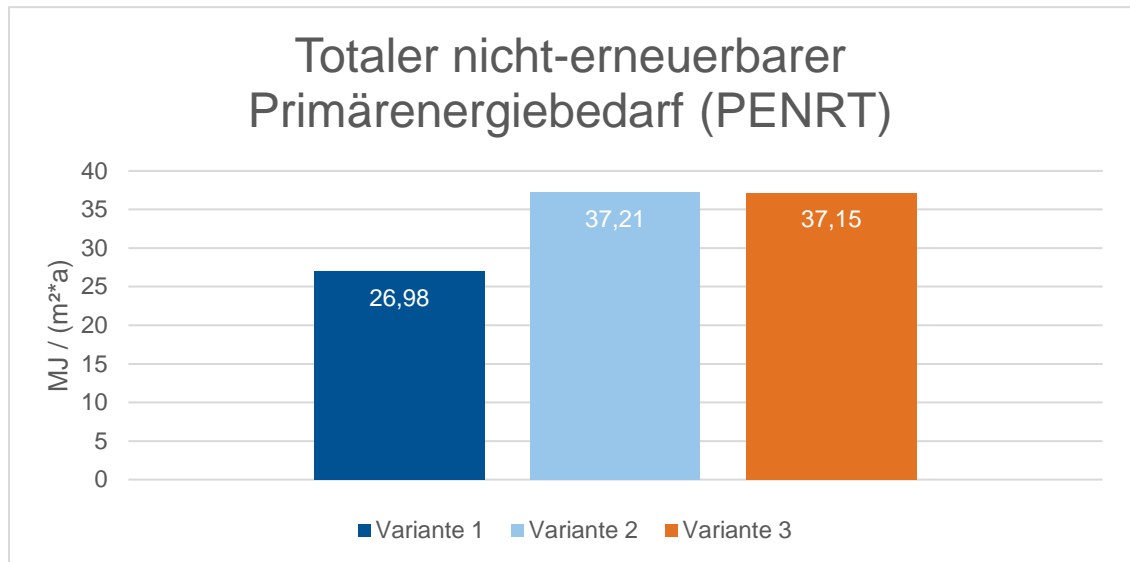
Abbildung 29: Gesamtergebnis des Indikators Treibhauspotential aufgeteilt nach Bauteilgruppen (eigene Darstellung)

- Das **Fundament** der Sanierungsvariante (Variante 1) zeigt niedrigere Ergebnisse als die zwei Neubauvarianten (Variante 2/ 3). Erklären lässt sich das durch das Bestandsfundament der Sanierung. Dieses fußt auf einem Streifenfundament aus dem Jahr 1942, wodurch es als Bestand gilt und somit nur das Lebenszyklusende mitbilanziert wird. Gedämmt wurde das Bestandsfundament wie auch die Neubaufundamente außenseitig mit 100mm XPS-Dämmung. Die Neubauvarianten besitzen die exakt gleichen Fundamente, wodurch ein identischer Wert zustande kommt. Dies bedeutet, dass der Unterschied im Endergebnis der Fundamente auf die Bestandsmaterialien zurückzuführen ist.
- Der kleinere Wert der **Bodenplatte** der Variante 1 im Vergleich zur Variante 2/3 lässt sich auf verschiedene Dämmstoffe und Materialstärken zurückführen. Variante 1 besitzt keine XPS-Dämmung unter der Bodenplatte und eine um 100mm schwächere Stahlbetonbodenplatte. Um trotzdem einen ähnlichen wärmetechnischen Kennwert zu erhalten und dabei keine Raumhöhe zu verlieren, wurde auf PUR-Dämmung mit einem niedrigen Lambda-Wert über der Bodenplatte, anstelle von EPS-Dämmung, zurückgegriffen. Der Rest des Bodenaufbaus ist zwischen den Varianten identisch. Daraus kann man schließen, dass vor allem die dünnere Stahlbetonbodenplatte und die fehlende XPS-Dämmung zu niedrigeren Werten der Variante 1 führen. Darüber hinaus weist die PUR-Dämmung einen ca. zweimal höheren GWP-Wert auf als die EPS-Dämmung (vgl. Ökobaudat).
- Die **Innenwände** der Variante 2 besitzt den höchsten Beitrag zum GWP. Dies liegt an den verbauten Mauerziegeln. Variante 3 schneidet dagegen besser ab, da die Innenwände aus Massivholz bestehen und biogene Baustoffe Gutschriften erhalten. Den geringsten Wert erreicht Variante 1. Dies liegt an dem Bestandsmauerwerk, da in der Bilanzierung nur noch das Lebenszyklusende des Materials mit einfließt.
- Die Ergebnisse des GWP der **Außenwände** haben gezeigt das Variante 1 mit dem gedämmten Bestandsmauerwerk besser abschneidet als Variante 3, obwohl diese Massivholz beinhaltet und somit Gutschriften bekommt. Das basiert, wie bei den Innenwänden erwähnt, auf der Bilanzierungsweise von Bestandsbauteilen. Dabei wird angenommen, dass die Materialherstellung theoretisch bereits in dem ersten Bauteillebenszyklus berücksichtigt wurde. Deshalb wird die

Herstellung kein zweites Mal bilanziert, sondern nur das Lebenszyklusende des Bestandsmaterials. Die monolithische Wand der Variante 2 erzielt den höchsten Wert im GWP. Vor allem die Produktion der Mauerziegel ist sehr energieaufwändig und trägt zu dem hohen Ergebnis bei.

- Die **Decke** der Variante 1 weist den niedrigsten Wert auf. Zurückzuführen ist das auf den hohen Holzanteil, der verbaut wird. Ähnlich zur Massivholzdeckenkonstruktion der Variante 3 entsteht dadurch ein Vorteil in der Berechnung. Interessant sind die Schalungsbretter und Holzbalken der Holzbalkendecke der Variante 1. Diese verbleiben im Bestand und werden weitergenutzt. Durch die vorher erklärten Gutschriften für biogene Materialien, entsteht hier jedoch sogar ein Nachteil für die Bestandskonstruktion. Dies liegt an den fehlenden Herstellungsgutschriften und den mit einzubeziehenden Lebenszyklusende des Materials. Die Decken der Variante 2 sind Stahlbetondecken, was gegenüber der Variante 3, die mit Massivholzdecken geplant ist, einen signifikanten Nachteil beim Ergebnis des GWP ergibt.
- Das **Dach** wird bei allen Bauweisen gleich ausgeführt, wodurch sich keine Unterschiede zwischen den Bauweisen ergeben.

3.4.6.5. Gesamtergebnisse der Ökobilanz des Indikators PENRT



**Abbildung 30: Graphische Darstellung der absoluten Werte für den maßgebenden Wirkungsin-
dikator totaler nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) (eigene Darstellung)**

In Abbildung 30 sind die absoluten Werte der PENRT über den gesamten Lebenszyklus graphisch dargestellt. Der Indikator zeigt höhere Berechnungswerte für die Neubauvarianten. Diese sind um 36% erhöht. Ziegel-Neubau und Holzmassiv-Neubau sind nahezu identisch. Zurückzuführen ist das auf die Herstellung der Materialien, wofür oft fossile Energieträger verwendet werden müssen. Im Bestand ist dieser Wert niedriger, weil die Herstellungsphase nicht in die Berechnung mit einfließt.

Der totale nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) ist, wie oben genannt, ausschlaggebend für die Beantwortung der Forschungsfrage. Die Ökobilanz-Ergebnisse des Indikators sind im folgenden Kapitel differenziert nach Bauteilgruppen zusammengefasst.

3.4.6.6. Ergebnisse der Ökobilanz des Indikators PENRT differenziert nach Bauteilgruppen

Den größten Anteil am PENRT über alle Bauteile hat das Satteldach mit 10,27 MJ/(m²*a). Dieses besitzt eine Bezugsfläche von 157,3 m². An zweiter Stelle steht die Deckenkonstruktion der Holzneubauvariante mit unter 10 MJ/(m²*a). Diese besitzt jedoch die größte Bezugsfläche mit 210 m². An dritter Stelle ordnet sich die Bodenplatte der Neubauvarianten mit 7,36 MJ/(m²*a) ein. Davon werden 122 m² verbaut. Daraus folgt das die Dachkonstruktion, anders als im Kapitel 3.4.6.4., unter allen Bauteilen, den höchsten flächenspezifischen Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie hat. Einen annähernd gleichen flächenspezifischen Bedarf besitzt die Bodenplatte der Neubauvarianten. Da die drei Dachkonstruktionen identisch sind, erreichen sie gleiche Werte.

Die Deckenkonstruktion und Wandaufbauten sind bei allen Varianten verschieden geplant, was zu Abweichungen führt. Diese sollen im Anschluss erklärt werden. Gleiches gilt für die Gründung, zu der Fundamente und Bodenplatte zählen.

Wie im Kapitel Treibhauspotential schon erklärt, sind für eine Ökobilanzierung die Endergebnisse wichtig. Es muss jedoch bedacht werden, dass im Fallbeispiel ein Mehrfamilienhaus mit zwei Geschossen erfasst wird. Hätten die Gebäude mehr als zwei Geschosse, wären die Außen- und Innenwände und auch die Geschossdecken anteilmäßig noch höher. Die Dachkonstruktion würde gleich bleiben. Die Endergebnisse der Bauteile wären dann ebenso maßgeblicher bei der Beurteilung der Gebäudevarianten.

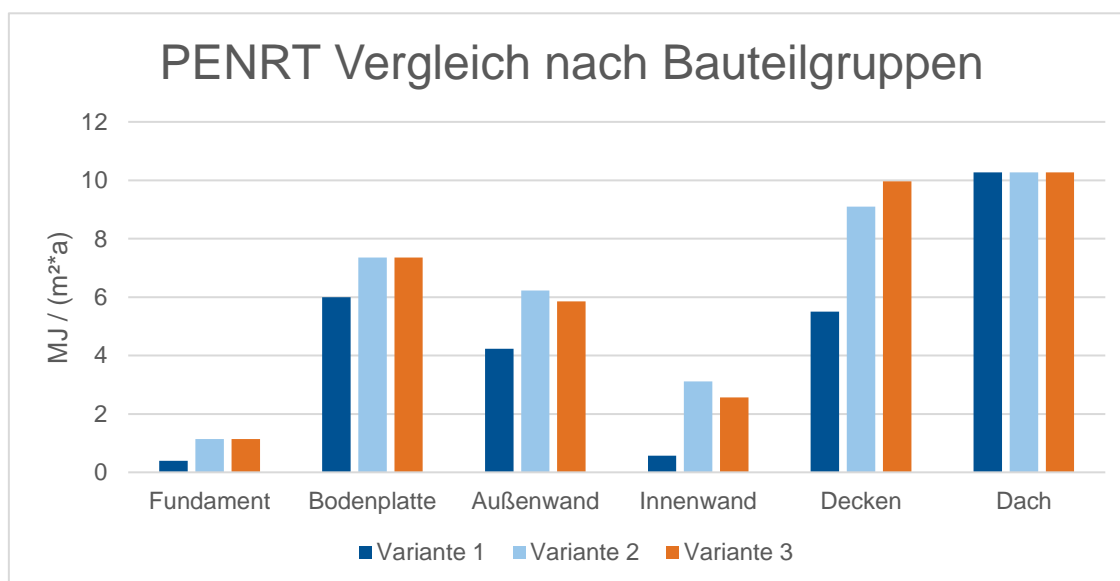


Abbildung 31: Gesamtergebnis des Indikators totaler nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf aufgeteilt nach Bauteilgruppen (eigene Darstellung)

- Das **Fundament** der Sanierungsvariante zeigt niedrigere Werte im PENRT. Variante 2 und 3 sind, durch gleiche Aufbauten, identisch. Erklären lässt sich das durch das Bestandsfundament der Sanierung. Dieses wird außenseitig mit XPS-Dämmung überdämmt. Der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf entsteht hauptsächlich durch die Herstellungsphase dieses Dämmstoffs, da die Herstellung des Betonfundaments nicht mehr berücksichtigt wird. Das Fundament der beiden Neubauvarianten wird ebenso mit XPS gedämmt. Somit resultiert der Unterschied aus den neuen Betonfundamenten, die mitbilanziert werden.
- Variante 1 besitzt im Vergleich zur **Bodenplatte** der Variante 2 und 3 einen veränderten Bodenaufbau. Somit lässt sich der Unterschied im PENRT auf verschiedene Dämmstoffe und Materialstärken zurückführen. Die Unterschiede im Aufbau wurden im Abschnitt 3.4.6.4. erläutert. Eine genauere Betrachtung nach Lebenszyklusphasen hat gezeigt, dass die Instandhaltung und auch das Ende des Lebenszyklus annähernd identisch sind. Man kann schlussfolgern, dass die Unterschiede, der Herstellung der Unterschiedlichen Materialien der Dämmung und Stärke der Bodenplatte entspringen.
- Die **Außenwände** sind in allen Varianten verschieden. Variante 1 erzielt die niedrigsten Ergebnisse. Grund ist wiederum das Bestandsmauerwerk, denn Mauerwerk muss in der Herstellung mit hohen Temperaturen gebrannt werden. Dies geschieht durch den fossilen Energieträger Gas. Verschlechtert wird das Ergebnis noch durch die Steinwolldämmung. Die Holzmassivwand der Variante 3 schneidet trotz des sehr hohen biogenen Materialanteil schlechter ab als Variante 1. Dies ist durch die Betrachtung der Lebenszyklusmodule begründet. Da das Modul D (Recyclingpotential) nicht betrachtet wird, fehlen den biogenen Materialien die Gutschriften. Zudem werden in der Ökobaudat hohe Werte für die nicht-erneuerbare Primärenergie angesetzt.
- Die **Innenwände** der Variante 2 besitzt den höchsten Beitrag zum PENRT. Dies liegt an den verbauten Mauerziegeln, welche unter hohem Energieaufwand gebrannt werden müssen. Die Holzmassivwände der Variante 3 schneidet dagegen besser ab, obwohl diese keine Gutschriften durch Recycling bekommen. Den geringsten Wert erreicht Variante 1. Dies liegt am Bestandsmauerwerk, da in der Bilanzierung nur das Lebenszyklusende des Materials mit einfließt. Das

bedeutet der geringe Wert der Sanierungsvariante im Diagramm stammt hauptsächlich vom neu aufgetragenen Innenputz.

- Bei den **Decken** kann man die größte Aufspaltung zwischen den Varianten bezüglich des PENRT erkennen. Variante 1 benötigt um über 4 MJ weniger Primärenergie als Variante 3. Dies liegt an den Holzwerkstoffen, die sowohl in Sanierung und in Holzneubau eingebaut sind. Im Sanierungsfall ist der größte Teil der Holzwerkstoffe Bestand. Somit werden die hohen Herstellungswerte der Datenbank nicht mit einkalkuliert. Anders als bei der dritten Variante. Hier gehen vor allem die Module A1-A3 mit einem großen Anteil ein. Variante 2 ist unwesentlich besser als Variante 3, jedoch erheblich höher als die Sanierung. Der Unterschied entsteht durch den Stahlbetonanteil der Geschossdecke und dem Estrich. Dazu kommt bei beiden Neubauvarianten der Zementestrich, der viel Primärenergie in der Herstellung benötigt und damit das Ergebnis negativ beeinflusst.
- Das **Dach** wird bei allen Bauweisen gleich ausgeführt, wodurch sich keine Unterschiede zwischen den Bauweisen ergeben.

4. Förderung der KfW

Die drei Gebäudevarianten (vgl. Kapitel 3) entsprechen einem KfW Effizienzhaus 55 (vgl. 2.2.6.) und haben damit einen besonders niedrigen Energieverbrauch. Genauer gesagt ist diese Gebäudekategorie um 45% sparsamer beim Primärenergiebedarf als das Referenzgebäude nach GEG. Diese Effizienzhausstufe soll 2023 zum Neubaustandard in Deutschland erklärt werden. Zudem ist sie, im Gegensatz zum Neubau, bei Sanierungen mit interessanten Förderungen verbunden.

Förderungen sind politische Lenkungsmittel. Sie werden genutzt, um gesellschaftlich, volkswirtschaftlich oder ökologisch bedingte Ziele zu erreichen. Die Förderung sorgt dafür, die Zusatzkosten energetischer Maßnahmen zu kompensieren und so die Attraktivität bzw. Wirtschaftlichkeit der Investition zu steigern.

Die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) wurde eingeführt, um die oben genannten Punkte zu erfüllen. Es soll Privatpersonen und Unternehmen Unterstützung bieten und so Energiekosten einsparen und dadurch das Klima schützen.

Die BEG besteht aus drei unterschiedlichen Programmen:

1. Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude (BEG WG)
2. Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude (BEG NWG)
3. Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM)

In dieser Arbeit wurden Wohngebäude betrachtet, weshalb im Folgenden nur die BEG WG beleuchtet wird. Dieses Teilprogramm wird von der KfW verwaltet. (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2022)

Förderung von Sanierungsvorhaben

Die KfW erhöht die Fördersummen, je energieeffizienter das Sanierungsgebäude ist. Das bedeutet, je kleiner die Effizienzhausstufe ist, desto mehr bekommt man gefördert. Ein wichtiger Aspekt ist zudem, dass die Förderungen pro Wohneinheit ausgezahlt werden. In Tabelle 30 sind die aktuellen Fördersummen (Stand 09/2022) für Sanierungsvorhaben aufgelistet.

Effizienzhaus	Tilgungszuschuss in % pro Wohneinheit	Betrag je Wohneinheit
Effizienzhaus 40	20% von max. 120.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 24.000 Euro
Effizienzhaus 40 Erneuerbare-Energien-Klasse	25% von max. 150.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 37.500 Euro
Effizienzhaus 55	15% von max. 120.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 18.000 Euro
Effizienzhaus 55 Erneuerbare-Energien-Klasse	20% von max. 150.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 30.000 Euro
Effizienzhaus 70	10% von max. 120.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 12.000 Euro
Effizienzhaus 70 Erneuerbare-Energien-Klasse	15% von max. 150.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 22.500 Euro
Effizienzhaus 85	5% von max. 120.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 6.000 Euro
Effizienzhaus 85 Erneuerbare-Energien-Klasse	10% von max. 150.000 Euro Kreditbetrag	bis zu 15.000 Euro

Tabelle 30: Tilgungszuschuss und Förderungsbeträge aufgelistet nach Effizienzhausstufe (KfW, 2022)

Die Variante 1 entspricht einem Sanierungsgebäude und fällt somit in diese Kategorie. Das Gebäude wurde als KfW 55 EH ausgelegt. Es wird fast vollständig von einer Wärmepumpe beheizt und fällt deswegen in die KfW 55 EH Erneuerbare-Energien-Klasse. Das Gebäude besitzt 2 Wohneinheiten und erreicht damit einen maximalen Förderbetrag von *60.000 Euro*.

Förderung von Neubauvorhaben

Die Varianten 2 und 3 entsprechen Neubauvorhaben. Sie erreichen den KfW 55 EH Standard. Seit 2022 werden jedoch keine Neubauvorhaben mehr gefördert, mit Ausnahme des KfW 40 EH mit Nachhaltigkeitsklasse. (KfW, 2022)

5. Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit war es die ökologische Nachhaltigkeit von Sanierungsgebäuden und Neubaugebäuden zu untersuchen. Außerdem stellte sich die Frage, ob das aktuelle Förderprogramm der KfW für die Klimaziele sinnvoll ist. Dafür wurde zunächst ein reales Bestandsgebäude ausgewählt, welches im Anschluss in drei Varianten unterteilt wurde. Einer Sanierung eines Bestandsgebäudes, einen Ziegel-Neubau und einen Holz-Neubau. Die drei Varianten sind bis auf die Bauteilaufbauten identisch.

Um die Gebäudevarianten vergleichbar auszulegen, wurde jeweils ein GEG-Nachweis erstellt, wodurch alle Varianten, im Sinne der Energieeffizienz, annähernd identisch sind (vgl. Kapitel 3.3.). Sie wurden dabei zu einem KfW-55 EH geplant, welches die Mindestanforderungen des GEG weit unterschreitet. Es benötigt 45% weniger Primärenergie als ein Gebäude, das nach dem aktuellen deutschen Mindeststandard errichtet wird.

Zur Erstellung des GEG-Nachweises wurde eine detaillierte Wärmebrückenberechnung durchgeführt. Durch die detaillierte Betrachtung konnten Schwachstellen der drei Gebäudevarianten aufgedeckt und beseitigt werden.

Die ökologische Nachhaltigkeit beinhaltet unter anderem den Aspekt der Energieeffizienz, um Gebäude zu bewerten. In unserem Fallbeispiel liegen drei hocheffiziente Mehrfamilienhäuser vor, welche auf dem aktuellen Stand der Technik sind. Damit ist ein erster Aspekt der ökologischen Nachhaltigkeit, die Energieeffizienz, für alle Varianten gleichermaßen erfüllt, nämlich die Minimierung der Energienutzung über die gesamte Betriebsphase.

Die Varianten wurden anschließend einer Ökobilanzierung unterzogen, um die ökologische Nachhaltigkeit der Baustoffe über den ganzen Lebenszyklus zu bewerten. Dabei wurden die Umweltwirkungen und der Energiebedarf der Baustoffe untersucht. Diese Methode gibt somit Aufschluss über den Ressourcenverbrauch bzw. Ressourceneffizienz und den Umweltwirkungen der Gebäude.

Es wurde ersichtlich, dass Sanierungsgebäude in fast allen Indikatoren die geringsten Umweltwirkungen aufweisen. Die Neubauvarianten erzielten fast immer schlechtere Ergebnisse, wobei der Ziegelneubau meist besser abschnitt als der Massivholzneubau.

Um detailliertere Ergebnisse zum Ursprung der Unterschiede zu erhalten, wurden die Indikatoren GWP und PENRT zu Leitindikatoren für die ökologische Nachhaltigkeit bestimmt und näher beleuchtet.

Beim Treibhauspotential erzielte die Sanierungsvariante im Vergleich zur Holzmassivvariante um 16,7% und im Vergleich zur Ziegelvariante 27,4% niedrigere Werte. Dies ergibt einen Unterschied von 1kg CO₂ Äq./m²*a). Der Unterschied kommt vor allem durch die nicht bilanzierten Herstellungsemissionen der Bestandsmaterialien und dem geringeren Bedarf an neuen Materialien zustande. Ähnlich verhält es sich mit dem Holzmassivhaus. Es emittiert über 0,5 CO₂ Äq./m²*a) weniger CO₂ über den gesamten Lebenszyklus. Zu erklären sind die erhöhten Emissionen wiederum durch die Bestandsmaterialien, die beim Neubau fehlen. Dabei fallen das Streifenfundament, die Bodenplatte und auch Innen- und Außenwände stark ins Gewicht. Der Grund dafür ist das Bestandsstreifenfundament aus Beton, die dünnere Bodenplatte aus Beton und die Bestandsziegel für Innen- und Außenwände.

Es geht aus der Ökobilanzierung hervor, dass alle biogenen Materialien, die im Neubau verwendet werden, einen positiven Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dadurch findet man das Holzmassivhaus im GWP mit niedrigeren Werten als das Ziegelhaus wieder. Interessant ist nun der Blick zum Sanierungsgebäude. Hier führen biogene Bestandsmaterialien nicht zur Besserung der Ergebnisse. Dies liegt an der Betrachtungsweise von Bestandsmaterialien, bei welchen die Phasen A1-A3 nicht mehr betrachtet werden. Damit führen biogene Bestandsmaterialien wie Holz zu einer Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zu den Neubauvarianten.

Dies eröffnet jedoch ein großes Problem für die Baustoffwahl. Da neue Materialien im Sanierungsfall bessere Werte in der Ökobilanzierung erzielen als biogene Bestandsmaterialien, kann es dazu führen, dass Planer zukünftig eher neue biogene Materialien verbauen. Damit können sie einfacher Gebäudezertifizierungen oder auch Förderungen erreichen. Im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit, geht ein solches Vorgehen jedoch in eine falsche Richtung. Solange Baustoffe nämlich weiter verwendbar sind, sollten sie das auch, da es am ressourceneffizientesten ist.

Die Ökobilanzierung der Gebäudevarianten hat im Bereich des GWP klar gezeigt, dass das Sanierungsgebäude einen positiven Einfluss auf die Klimabilanz des Gebäudesektors hat. Zudem wurde ersichtlich, dass die Neubauvarianten der Sanierung, beim

Aspekt der Baustoffwahl bzw. Ressourceneffizienz und damit in der ökologischen Nachhaltigkeit nachstehen.

Beim PENRT erhält die Sanierungsvariante wiederum bessere Ergebnisse. Gegenüber beiden Neubauvarianten ist die total nicht-erneuerbare Primärenergie über den Lebenszyklus um etwa 27% niedriger. Der Unterschied entspringt aus den Bestandsmaterialien, für welche bei der Sanierung keine Energie zur Herstellung mehr verwendet wird. Daraus lässt sich folgern, dass die Energieeffizienz der Materialien über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude bei der Sanierungsvariante am höchsten ausfällt. Damit ist gemeint, dass für ein Gebäude mit denselben Ausmaßen und gleicher Gebäudeausstattung weniger Energie verwendet wird, wodurch es effizienter mit Energie umgeht. Somit ist auch beim PENRT das Sanierungsgebäude mit weniger Umweltwirkungen belastet.

Zur Bewertung der Baustoffwahl und damit der ökologischen Nachhaltigkeit der Untersuchungsgebäude wurden der Ressourcenverbrauch und die Umweltwirkungen verglichen. Es hat sich gezeigt, dass in beiden Punkten das Sanierungsgebäude einem Neubau voraus ist. Die Umweltwirkungen sind in fast jeder Kategorie geringer. Beim Ressourcenverbrauch schneidet das Sanierungsgebäude auch besser ab. Es nutzt am wenigsten neue Materialien und erhält zu einem gewissen Grad die Ursprungsmaterialien. Zwischen den Neubauvarianten ist die Holzbauvariante für die Baustoffwahl am besten zu bewerten. Dies liegt einerseits an den besseren Ergebnissen in der Ökobilanz, andererseits jedoch am Baustoff Holz, da es ein nachwachsender Rohstoff ist.

Die Flächeninanspruchnahme bzw. Flächenversiegelung ist der letzte Aspekt, der für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit der Gebäudevarianten herangezogen wird. Hier muss zwischen Sanierungsgebäude und Neubau unterschieden werden. Ein Merkmal eines Sanierungsgebäudes ist, dass es standorttreu ist. Das bedeutet, es wird nicht mehr Fläche versiegeln als bisher, weil es am gleichen Standort verbleibt. Anders ist das bei einem Neubau. Dieser kann ebenso auf einer unbebauten Fläche errichtet werden und so Fläche verbrauchen und damit wichtige Bodenfunktionen einschränken. Auf der anderen Seite kann dieser auch anstatt eines Bestandsgebäudes erbaut werden und somit wird keine Fläche versiegelt. Das bedeutet, je nachdem, wo ein Neubau errichtet wird, ist er nach der Flächeninanspruchnahme unter dem Sanierungsgebäude anzusetzen oder gleichzusetzen.

Die ökologische Nachhaltigkeit sollte mit den Aspekten Energieeffizienz, Baustoffwahl und der Flächeninanspruchnahme bewertet werden. Es wurden Ergebnisse gefunden, die zeigen, dass die am meisten ökologisch nachhaltige Variante die Sanierung ist. Gefolgt vom Holzmassivhaus und dem Ziegelhaus.

Diese Arbeit beschränkt sich auf die ökologische Nachhaltigkeit. Interessant wäre der weiterführende Vergleich der sozialen und auch ökonomischen Qualität der Nachhaltigkeit für die Varianten. Nur wenn alle Bereiche der Nachhaltigkeit abgedeckt sind, kann eine aussagekräftige Antwort auf die Frage der Nachhaltigkeit von Gebäuden gegeben werden. Des Weiteren beschränkt sich diese Arbeit auf den Vergleich eines Sanierungsobjektes mit einem Neubauobjekt, welche hinsichtlich der Grundrisse und Orientierung identisch sind. Es werden also drei ähnliche Gebäude verglichen, wobei zwei auf einer un bebauten Fläche und das andere auf einem Bestandsgrundstück mit Bestandshaus gebaut wird. Damit wird in der Ökobilanz die Situation vernachlässigt, falls ein Bestandsgebäude für einen Neubau abgebrochen werden muss. In diesem Fall müsste der Abbruch des Bestandsgebäudes mit in die Ökobilanz des Neubaus einfließen. Es ist außerdem zu beachten, dass die Bestandserfassung teilweise auf Annahmen beruht, wie beispielsweise die λ -Werte der Bestandsziegel oder des Bestandsbetons. Diese könnten jedoch durch Messungen vor Ort erfasst werden. Weitere Probleme limitieren die Genauigkeit der Ökobilanz durch zu hoch angesetzte Umweltwirkungen der Bestandsmaterialien. Dazu zählen zum Beispiel das Beton-Streifenfundament das zu hoher Wahrscheinlichkeit keinen Stahl enthält und dadurch viel einfacher verwertbar ist. Wichtig zu erwähnen ist außerdem, dass sich die vorliegende Arbeit auf Mehrfamilienhäuser bezieht und somit nicht auf andere Gebäudetypen anwenden lässt.

Die wesentlichste Erkenntnis aus der Arbeit ist die holistische Betrachtung von Gebäuden, um Umweltwirkungen zu reduzieren. Diese Sichtweise befähigt uns, die ökologische Nachhaltigkeit von zukünftigen Gebäuden zu erhöhen. Um dies zu erreichen, müssen Gebäude bis hin zu den verwendeten Materialien beleuchtet werden und nicht nur über den Lebensweg. Dadurch können Materialien mit höheren Umweltwirkungen identifiziert und im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit angepasst werden. Dies führt dazu, Baustoffe aus der eigenen Region zu nutzen, auf synthetische Materialien zu verzichten, Materialien aus ökologisch nachhaltig erwirtschafteten Ressourcen zu nutzen und auch den Gebrauch von Betonen zu vermeiden. Zudem wurde ersichtlich, dass zukünftige Umnutzungen einplant werden müssen, um die Nachhaltigkeit dauerhaft zu gewährleisten. Um den richtigen Weg zwischen ökologischer, ökonomischer und

sozialer Nachhaltigkeit zu finden, benötigt es jedoch noch mehr Forschung und den Willen der Bauherren zur Umsetzung.

In der vorliegenden Arbeit wurde als weitere Forschungsfrage der Einfluss von Sanierungsgebäuden zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung genannt. Zudem wurde aufgeworfen, ob aktuelle Förderprogramme förderlich für die Erfüllung sind. Dazu liefert die Ökobilanz des Sanierungsgebäudes im Global Warming Potential Antworten. Das Sanierungsgebäude schneidet um 16,7% besser ab im Vergleich zur Holzmassivvariante. Dies entspricht etwa 0,5 kg CO₂-Äq./(m²*a). Im Vergleich zum Ziegelneubau schneidet die Sanierungsvariante sogar um 27,4% besser ab, was etwa 1kg CO₂-Äq./(m²*a) entspricht. Damit wird ersichtlich, dass ein Sanierungsgebäude einen positiven Einfluss auf die Klimabilanz des Gebäudesektors hat im Vergleich zu einem Neubau.

Der Unterschied von 1kg CO₂ Äq./(m²*a) erscheint zunächst gering. Bringt man diesen jedoch in Zusammenhang mit der großen Menge an Altbauten in Deutschland, entsteht in Zukunft ein riesiges Einsparpotential für den Gebäudesektor. Und dabei entsteht dieses Potential nicht aus der Energieeinsparung durch die Betriebsphase, wie beispielsweise dem gesenkten Wärmebedarf, sondern durch die Herstellung und das Ende des Lebenszyklus der Materialien.

Die KfW.Bank fördert seit 2022 nur noch Sanierungsgebäude. Dies erschien vielen Energieberatern als Fehlentscheidung, weil dadurch bei Neubaugebäuden weniger auf Energieeffizienz gesetzt wird. Aus dieser Arbeit geht jedoch hervor, dass es bezüglich der Klimaziele die richtige Entscheidung war. Das bedeutet, das aktuelle Förderprogramm trägt zur Erreichung der Klimaziele bei und sollte weiter auf Sanierungen fokussiert sein.

6. Ausblick und Empfehlungen

Wie am Beginn der Arbeit erklärt, hat sich Deutschland hohe Klimaschutzziele gesetzt. Um diese schnellstmöglich zu erreichen, müssen alle Sektoren in eine emissionsarme Richtung gelenkt werden. Der Gebäudesektor spielt dabei eine entscheidende Rolle. Um diese Rolle auszufüllen, müssen Privatleute ebenso wie öffentliche Einrichtungen gefördert und so hin zu mehr Energie- und Ressourceneffizienz begleitet werden.

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass das aktuell angebotene Förderprogramm, der KfW, hilfreich ist, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen. Trotzdem sollen die aktuellen KfW-Förderungen zum Jahr 2023 neu aufgelegt werden. Dazu sollen Vorschläge bzw. Empfehlungen gegeben werden.

Zunächst sollte eine Ökobilanz in der energetischen Vorplanung von Gebäuden Pflicht werden, um eine Förderung zu bekommen, damit der Einsatz von Materialien mit hohen Umweltwirkungen reduziert wird. Dies hätte ebenso eine Lenkwirkung für die Industrie, welche sich mit Produkten und Preisen in Richtung von ökologisch nachhaltigeren Materialien bewegen müsste. Des Weiteren sollte an den Richtlinien zu biogenen Bestandsmaterialien gearbeitet werden, da es nicht zielführend ist, im Sinne der Ressourceneffizienz neue biogene Materialien zu verwenden, um bessere Ergebnisse in der Ökobilanz zu erzielen. Ein weiterer Vorschlag für das Förderprogramm 2023 ist eine eigene Kategorie für Neubaugebäude auf Bestandsflächen einzuführen, falls der Bestand nachweislich nicht saniert werden kann. Bis zum jetzigen Zeitpunkt untergliedert die KfW nur in Neubau- und Sanierungsgebäude. Dabei wird aber der Aspekt der Flächeninanspruchnahme vernachlässigt. Deshalb sollte es eine „Ersatzhauskategorie“ geben, in der dieser Fall abgedeckt ist.

Die Zukunft des Gebäudesektors steht fest. Ziel jeder Sanierung und Neubaus wird sein, ein energieeffizientes und vor allem nachhaltiges Gebäude zu errichten. Dazu sollten einige Grundaspekte von nachhaltigen Gebäuden beachtet werden. Zunächst sollten mehr biogene Materialien verwendet werden, da diese als Kohlenstoffspeicher fungieren. Für Sanierungen gilt, je höher der Anteil der weiterverwendeten Bestandsmaterialien, desto höher die Ressourceneffizienz. Dabei sollten auch biogene Bestandsmaterialien wegen dem Ressourcenverbrauch belassen werden, obwohl es die Ökobilanz verschlechtern. Beton sollte weitestmöglich vermieden werden. Es müssen Alternativen

gefunden werden, wie zum Beispiel der Einsatz von Recyclingbeton, die Schichtdicken des Betons zu verringern oder aber Bauteile komplett abzuändern. Beispielsweise könnte man auf die Bodenplatte komplett verzichten und nur Streifenfundamente einsetzen, wie es im Bestandsgebäude des Kapitel 3. der Fall war. Um Gebäude energieeffizient zu bauen, braucht es hohe Dämmstärken. Dafür sollten ausschließlich erneuerbare Naturprodukte eingesetzt werden. Zuletzt sollte noch Augenmerk auf die Gebäudekonstruktion gelegt werden. Bei dieser ist auf Simplizität zu achten, um hohe Rückbaubarkeit zu gewährleisten.

In der Diskussion um nachhaltige Gebäude gibt es viele gute Ansätze. Die meisten zielen dabei auf eine Steigerung der Effizienz oder aber der Konsistenz ab. Dies ist ein Schritt in die richtige Richtung, jedoch sollte die Suffizienz nicht vergessen werden. Dies bedeutet nur so groß zu bauen wie unbedingt nötig. Denn ein Gebäude kann noch so effizient und ressourcenschonend gebaut werden, wenn es flächenmäßig zu groß für die geplante Nutzung ist, geht der Nachhaltigkeitsgedanke verloren. Denn nachhaltig sind nur Gebäude, die die Bedürfnisse der Bewohner erfüllen, ohne die möglichen Bedürfnisse kommender Generationen in Gefahr zu bringen.

Literaturverzeichnis

- Becker, S., Hagen, J. & Krüger, R. *dena-Gebaeudereport 2022*.
- Bosch Thermotechnik GmbH. *Wärmepumpe mit Photovoltaik kombinieren*.
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. (2017). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltigem Bauen*. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. *Allgemeines Merkblatt zur Antragstellung: Bundesförderung für effiziente Gebäude - Einzelmaßnahmen (BEG EM) - Zuschuss*. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). *ÖKOBAUDAT-Handbuch: Technische Beschreibung von Datensätzen in ÖKOBAUDAT inkl.*
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. (2019). *Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden*.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB): Büro- und Verwaltungsgebäude*. <https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/RunderTisch/steckbriefe-2010/111.pdf>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2014). *Sanierungsbedarf im Gebaeudebestand*.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *Energiesparen für mehr Unabhängigkeit: Arbeitsplan Energieeffizienz*.
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2021). Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3: Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude.
- Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 10 (2019). <http://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>
- DGNB GmbH (2018). *Leitfaden zum Einsatz der Ökobilanzierung*.
- Friedrichsen, S. (2018). *Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56553-7>
- Frischknecht, R. (2020). *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54763-2>
- Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., Musso, F., Petzinka, K.-H. & Rudolphi, A. (Hrsg.). (2008). *Atlas Sanierung: Instandhaltung, Umbau, Ergänzung* (1. Aufl.). Birkhäuser; Ed. Detail.
- KfW. (2022, 29. August). *Was ist ein Effizienzhaus? Sanieren und Förderung nutzen*. <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/Energieeffizient-sanieren/Das-Effizienzhaus/>

- Marquardt, H. (2021). *Energiesparendes Bauen : Ein Praxisbuch für Architekten, Ingenieure und Energieberater Wohngebäude nach GEG 2020*. Beuth Verlag.
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/munchentech/detail.action?docID=6643190>
- Pehnt, M. (2010). *Energieeffizienz*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-14251-2>
- Report of the World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (15. Juni 2022). Wie viel CO₂ darf Deutschland maximal noch ausstoßen? Umweltrat aktualisiert CO₂-Budget. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_06_fragen_und_antworten_zum_co2_budget.html
- Schild, K. (2018). *Wärmebrücken*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20709-0>
- Stahr, M. (2018). *Sanierung von baulichen Anlagen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20475-4>
- Vogdt, F. U. (2022). *Bauphysik*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2189-8>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Graphical representation of the absolute values for GWP (own representation).....	8
Abbildung 2: Graphical representation of the absolute values for the PENRT (own representation)	8
Abbildung 3: Graphische Darstellung der absoluten Werte für das GWP (eigene Darstellung).....	10
Abbildung 4: Graphische Darstellung der absoluten Werte für das PENRT (eigene Darstellung).....	10
Abbildung 5: Vergleich bisheriger Treibhausgas- und CO ₂ -Emissionen, THG-Pfade gemäß KSG und Projektionsbericht sowie CO ₂ -Budget nach SRU-Berechnung (Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU], 2022a, S.23)	15
Abbildung 6: Treibhausgasemissionen für alle Sektoren und für die Errichtung und den Betrieb von Hochbauten nach Verursacherprinzip (Becker et al., 2022, S.55).....	16
Abbildung 7: Verteilung des Wohngebäudebestands gruppiert nach Baualter (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2014, S. 5)	17
Abbildung 8: Verteilung des flächenbezogenen Endenergieverbrauchs des Gebäudebestands nach Baujahren in kWh/m ² a (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2014, S. 7)	17
Abbildung 9: Dimensionen der Nachhaltigkeit (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019)	21
Abbildung 10: Qualität der Nachhaltigkeit (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019)	22
Abbildung 11: Einflussnahmemöglichkeiten auf die Bauwerkseigenschaften während der Planung (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2019, S.44)	25
Abbildung 12: Typische Wärmebrücken an einem Wohngebäude (Stahr, 2018, S. 41)	29
Abbildung 13: Darstellung der Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15978 (DGNB GmbH, 2018a)	33
Abbildung 14: Nord-Ost Ansicht (eigene Aufnahme).....	38
Abbildung 15: Sanierungsobjekt Nordwestansicht (eigene Aufnahmen)	38
Abbildung 16: Sanierungsobjekt Südansicht (eigene Aufnahmen)	38

Abbildung 17: Sanierungsobjekt Fenster und Wärmeübergabe (eigene Aufnahmen).....	39
Abbildung 18: Sanierungsobjekt Dachaufbau (eigene Aufnahmen).....	39
Abbildung 19: Veraltetes Stromsystem bzw. Sicherungskasten (eigene Aufnahme).....	40
Abbildung 20: Farbabplatzungen und Schimmel an Außenwand (eigene Aufnahme).....	40
Abbildung 21: Heizungsanlage (Nachtspeicheröfen) im Sanierungsgebäude (eigene Aufnahmen).....	41
Abbildung 22: Veraltete und unfachmännisch verbaute Warmwasserbereitung (elektrischer Warmwasserboiler) (eigene Aufnahmen)	41
Abbildung 23: Putzabplatzungen an Außenwand (eigene Aufnahmen)	41
Abbildung 24: Fehlender Fußbodenbelag (eigene Aufnahmen)	41
Abbildung 25: Raumseitig verlegte Verteilleitungen für Heizkörper (eigene Aufnahmen).....	41
Abbildung 26: Darstellung der Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15978 (DGNB GmbH, 2018a)	68
Abbildung 27: Ergebnisse aller Wirkungsindikatoren der Varianten 2 und 3 in Relation zu Variante 1 (eigene Darstellung)	73
Abbildung 28: Graphische Darstellung der absoluten Werte für den maßgebenden Wirkungsindikator Treibhauspotential (eigene Darstellung).....	75
Abbildung 29: Gesamtergebnis des Indikators Treibhauspotential aufgeteilt nach Bauteilgruppen (eigene Darstellung)	76
Abbildung 30: Graphische Darstellung der absoluten Werte für den maßgebenden Wirkungsindikator totaler nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) (eigene Darstellung).....	79
Abbildung 31: Gesamtergebnis des Indikators totaler nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf aufgeteilt nach Bauteilgruppen (eigene Darstellung).....	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnungen der Wärmebrücken aus Abbildung 8	29
Tabelle 2: Auflistung der Effizienzhausstufen mit Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust (KfW, 2022)	32
Tabelle 3: Gebäudedaten zum Sanierungsobjekt (vgl. Anhang M).....	42
Tabelle 4: Auflistung der U-Werte der Variante 1	44
Tabelle 5: Aufbau Bodenplatte der Variante 1 (vgl. Anhang A)	45
Tabelle 6: Aufbau Außenwand der Variante 1 (vgl. Anhang A)	46
Tabelle 7: Aufbau Außenwand gegen unbeheizte Garage der Variante 1 (vgl. Anhang A).....	46
Tabelle 8: Aufbau Satteldach der Variante 1 (vgl. Anhang A)	47
Tabelle 9: Anlagenbeschreibung der Heizung und Warmwasserbereitung	48
Tabelle 10: Beschreibung der Lüftungsanlage	49
Tabelle 11: Auflistung der U-Werte der Variante 2.....	52
Tabelle 12: Aufbau Bodenplatte der Variante 2 (vgl. Anhang B)	53
Tabelle 13: Aufbau Außenwand der Variante 2 (vgl. Anhang B)	53
Tabelle 14: Aufbau Außenwand gegen unbeheizte Garage der Variante 2 (vgl. Anhang B).....	53
Tabelle 15: Aufbau Satteldach der Variante 2 (vgl. Anhang B).....	54
Tabelle 16: Auflistung der U-Werte der Variante 3.....	57
Tabelle 17: Aufbau Bodenplatte der Variante 3 (vgl. Anhang C)	57
Tabelle 18: Aufbau Außenwand der Variante 3 (vgl. Anhang C)	58
Tabelle 19: Aufbau Außenwand gegen unbeheizte Garage der Variante 3 (vgl. Anhang C).....	59
Tabelle 20: Aufbau Satteldach der Variante 3 (vgl. Anhang C)	59
Tabelle 21: Auflistung der Vergleichsgrößen.....	62
Tabelle 22: Energetisch bedeutsame Schichten der Bauteilaufbauten der drei Varianten im Vergleich; Identische Aufbauten sind in blau markiert.....	63
Tabelle 23: Vergleich der Psi-Werte der drei Gebäudevarianten.....	64
Tabelle 24: Vergleich der Psi-Werte der drei Gebäudevarianten.....	65
Tabelle 25: Vergleich der Psi-Werte der drei Gebäudevarianten.....	65
Tabelle 26: Vergleich der Wärmebrückenzuschläge der drei Gebäudevarianten	66

Tabelle 27: Auflistung der Bauteilflächen	69
Tabelle 28: Berechnung der Bruttogrundfläche der drei Gebäudevarianten	71
Tabelle 29: Gewichtungsschlüssel der Umweltindikatoren zur Ermittlung der gewichteten Umweltwirkungen (DGNB GmbH, 2018a).....	72
Tabelle 30: Tilgungszuschuss und Förderungsbeträge aufgelistet nach Effizienzhausstufe (KfW, 2022)	84

Anhangverzeichnis

- Anhang A: GEG-Nachweis Sanierung
- Anhang B: GEG-Nachweis Neubau Ziegel
- Anhang C: GEG-Nachweis Neubau Holzmassiv
- Anhang D: Wärmebrücken Sanierung
- Anhang E: Wärmebrücken Neubau Ziegel
- Anhang F: Wärmebrücken Neubau Holzmassiv
- Anhang G: Massenbilanz Sanierung
- Anhang H: Massenbilanz Neubau Ziegel
- Anhang I: Massenbilanz Neubau Holz
- Anhang J: Wirkungsabschätzung Sanierung
- Anhang K: Wirkungsabschätzung Neubau Ziegel
- Anhang L: Wirkungsabschätzung Neubau Holzmassiv
- Anhang M: GEG-Nachweis Bestandsgebäude vor Sanierung