BAU INDUSTRIE
Bayern

Technische Universität München

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

BEWOOpt

Ökologisch und ökonomisch optimierte serielle Typenhäuser

DER BAYERISCHE BAUINDUSTRIEVERBAND E.V.

- Wirtschaftsverband
- Tarifpartner
- Bildungsträger
- Informationen für den Bau

Der Bayerische Bauindustrieverband ist mit all seinen Leistungen seinen Mitgliedern verpflichtet. Dazu gehören eine umfassende Information und Beratung der Mitgliedsfirmen in politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Fragen, die Sicherung branchenspezifischer Aus- und Weiterbildung, die Verhandlung von Tarifverträgen, die Schaffung einer Plattform zum Erfahrungsaustausch zwischen den Unternehmen der Bauindustrie und die Förderung von Innovationen in Forschung und Entwicklung.

INNOVATION

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.

BEWOOpt

Inhalt

Inhalt **4**

Vorwort **5**

Abkürzungsverzeichnis und verwendete Einheiten 6

Zusammenfassung **7**

Einführung **8**

Projekt und Gebäudevorstellung **9**

2.1. Ziel des Forschungsprojekts 9
2.2. Beschreibung des Fallbeispiels 10
2.3. Baukonstruktion 11
2.4. Technische Gebäudeausrüstung 13

Methodisches Vorgehen **14**

3.1. Grundlagen 14
3.2. Lebenszyklusanalyse 16
3.3. Thermische Gebäudesimulation 17
3.4. Umweltfolgekosten 17
3.5. Ökologischer Flächenbedarf 18

Ergebnisse **20**

4.1. Ökobilanzierung der Ausführungsvarianten 20
4.2. Ökobilanzierung der parametrischen Optimierung 22
4.3. Anrechnung von erneuerbar erzeugtem Strom 24
4.4. Ökologischer Flächenbedarf 25
4.5. Einordnung der Ergebnisse anhand der Umweltfolgekosten 26

Zusammenfassung und Ausblick **27**

Tabellenverzeichnis **28**

Abbildungsverzeichnis **28**

Literaturverzeichnis **29**

Vorwort

Der wachsende Bedarf an Wohn- und Arbeitsraum ist insbesondere in den bayerischen Städten und Metropolregionen besonders hoch. Zusammen mit dem steigenden Bewusstsein für eine nachhaltige gesellschaftspolitische Entwicklung ergeben sich neue und spannende Herausforderungen im Themenkomplex der nachhaltigen Entwicklung im Baugewerbe. Um diese Herausforderungen zu meistern bedarf es einer interdisziplinären und eng verzahnten Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Baupraxis. Dazu werden wissenschaftlich ausgearbeitete, Methoden in die Baupraxis übertragen und bereits in der Planung von Sanierungs- und Neubauvorhaben diskutiert und umgesetzt. Dabei ist der lebenszyklusbasierte Bewertungsansatz zentrales Element der Entwicklung und Erarbeitung der genannten Methoden, die von der Analyse der Umweltfolgekosten bis zur lebenszyklusbasierten ökologischen Analyse von Gebäuden reicht.

Praxistaugliche und umsetzbare Strategien werden für die Realisierung der nachhaltigen Entwicklung im Baugewerbe erarbeitet und deren Anwendung an konkreten Fallbeispielen präsentiert. Bauherren, Städte und Kommunen werden für den Umgang mit dem Themenkomplex der nachhaltigen Entwicklung sensibilisiert und bekommen zudem konkrete Strategien zu dessen Umsetzung an die Hand.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „BEWOOpt“ wurden in Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München, der wbg Nürnberg GmbH, der Ferdinand Tausendpfund GmbH und die Stiftung Bayerisches Baugewerbe, Umsetzungsstrategien zur Realisierung von ökologisch optimierten seriellen Typenhäusern für den bezahlbaren Wohnungsbau entwickelt.

Abkürzungsverzeichnis und verwendete Einheiten

AP	Versauerungspotenzial (en: Acidificationpotential)
EG	Erdgeschoss
ELD	Ökologischer Flächenbedarf (en: Ecological Land Demand)
ENPB	Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
EoL	End of Life
EP	Eutrophierungspotenzial (en: Eutrphicationpotential)
GWP	Global Warming Potential
HJ	Hookes-Jeeves
LCA	Life Cycle Assessment
NGF	Nettogrundfläche
PV	Photovoltaik
ST	Solarthermie
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TUM	Technische Universität München
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt „BEWOOpt“ hat zum Ziel, in Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München, der wbg Nürnberg, der Ferdinand Tausendpfund GmbH und der Stiftung Bayerisches Baugewerbe, ökologisch und ökonomisch optimierte Typenhäuser mit hohem Serienfaktor zu entwickeln. Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Bauweisen hinsichtlich ihrer lebenszyklusbasierten energetischen, ökonomischen und ökologischen Potentiale für den bezahlbaren Wohnungsbau verglichen und bewertet. Analysiert werden dabei zwei verschiedene Baukonstruktionsarten (Massivbauarten und eine Holz-Hybrid-Konstruktion). Darüber hinaus werden verschiedene mögliche Energieerzeugungsarten sowie Wärmeübergabesysteme der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und die Flächeneffizienz unter Berücksichtigung der Bauteildimensionierungen untersucht.
Dabei werden anhand von energetischen und ökologischen Lebenszyklusanalysen (LCA) und Umweltfolgekosten (Emissionskosten) Einsparpotenziale für die zu entwickelnden Typenhäuser analysiert und identifiziert. Hieraus leiten sich Konzepte zur Entwicklung und Realisierung ökologischer und ökonomischer serieller Typenhäuser für den geförderten Wohnungsbau ab.
Die Projektergebnisse sind in diesem Bericht zusammengefasst und veranschaulicht. Die Ergebnisse dienen zum einen dazu, praxistaugliche und umsetzbare Strategien zur Planung und Realisierung der untersuchten Typenhäuser aufzuzeigen. Zum anderen können die Ergebnisse als Entscheidungsunterstützung für Handlungsempfehlungen für vergleichbare Praxis- und Forschungsprojekte herangezogen werden.

I. Einführung

Der Klima- und Umweltschutz stellen einer der größten Herausforderungen der heutigen und zukünftigen Generation dar.
In Bezug auf den Klimawandel und den sich daraus ergebenden Herausforderungen für unsere Gesellschaft spielt die Bauindustrie durch ihren hohen Ressourcenverbrauch weltweit eine wichtige Schlüsselrolle beim Klimaschutz. Rund 35 % des Endenergiebedarfs und 38 % der CO_2-Emissionen entfallen auf den Gebäudesektor [1].
Darüber hinaus ist der Umweltschutz ebenso bedeutend, da dabei funktionierende Ökosysteme geschützt werden, die eine wesentliche Grundlage für das Überleben der Menschheit darstellen. Hinsichtlich der Funktion von Ökosystemen und dem Erhalt der Biodiversität stellen Luftschadstoffen ein großes Risiko dar. Durch einen übermäßigen Eintrag von Luftschadstoffen können Ökosystemen destabilisiert und damit anfälliger gegenüber Klimaänderungen werden. [2]
In Deutschland begegnet man im Bausektor diesen Herausforderung beispielsweise mit dem im November 2020 eingeführten Gebäudeenergiegesetz (GEG) [3]. Im Rahmen des GEG sind bau- und anlagentechnische Anforderungen in Bezug auf den energieeffizienten Gebäudebetrieb beschrieben. Definiert sind dabei konkrete Anforderungen sowohl an die thermische Gebäudehülle und die einzuhaltenden Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) als auch an den jährlichen Primärenergiebedarf. Im Zuge von Novellierungen verschärfen sich die Anforderungen stetig, was zu höheren Dämmstandards, d.h. einem erhöhten Einsatz an Wärmedämmung führt. Dadurch sinkt zwar der Energiebedarf während der Nutzungsphase des Gebäudes, jedoch steigen, bedingt durch den erhöhten Materialeinsatz, der Energiebedarf und die Umweltwirkungen für die Herstellung der Materialen, deren Instandhaltung und Austausch sowie deren Entsorgung. Dieser Energiebedarf und die daraus resultierenden Emissionen werden als „Graue Energie“ und „Graue Emissionen“ deklariert. Die Analyse und Bewertung der Grauen Energie und Emissionen werden allerdings weder im GEG, noch in einer anderen, baurechtlich bindenden Verordnung und Richtlinie, in Deutschland berücksichtigt. Um den Ressourcenverbrauch sowie die Klima- und Umweltauswirkungen des Gebäudesektors senken zu können, wird es zukünftig erforderlich sein, Gebäude lebenszyklusorientiert zu betrachten, zu analysieren, zu bewerten und vor allem zu optimieren.
Neben dem Erfordernis, den energetischen und stofflichen Ressourcenbedarf von Gebäuden über deren Lebenszyklus hinweg ökologisch zu bewerten, bedarf es gleichzeitig einer ökomischen Bewertung. Denn ökologisch sinnvolle Maßnahmen lassen sich nur dann effektiv einsetzen bzw. in der Praxis umsetzen, wenn diese ökonomisch tragbar sind. Dieses Argument fällt speziell beim seriellen, sozialen Wohnungsbau auf kommunaler Ebene ins Gewicht. Aufgrund dessen nimmt das hier beschriebene Projekt die Schnittstelle zwischen ökologischen und ökonomischen Fragestellungen in den Fokus.

II. Projekt und Gebäudevorstellung

2.1. Ziel des Forschungsprojekts

Ziel des Forschungsprojekts ist es, Umsetzungsstrategien zur Realisierung von ökologisch und ökonomisch optimierten seriellen Typenhäusern für den bezahlbaren Wohnungsbau zu analysieren und zu entwickeln. Bisherige Umsetzungshemmnisse hin zu kostengünstigen und ökologischen Gebäuden im bezahlbaren Wohnungsbau werden identifiziert und geeignete Maßnahmen ausgearbeitet. Die Ergebnisse werden so aufbereitet und systematisiert, dass diese auf andere Wohnbauprojekte bzw. -gebäude angewendet werden können.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird ein lebenszyklusbasierter Bewertungsansatz zur Analyse der ökologischen und ökonomischen Eigenschaften der Typenhäuser angewendet. Nur durch die Nutzung von Synergieeffekten zwischen der Ökologie und Ökonomie kann die Bereitstellung von bezahlbarem und nachhaltigen Wohnraum realisiert werden.

Es werden daher, in Zusammenarbeit mit der Baupraxis (Wohnungsbaugesellschaft aus Nürnberg sowie Bauindustrieunternehmen aus Regensburg) ökologisch und ökonomisch optimierte Typenhäuser mit hohem Serienfaktor entwickelt. Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Bauweisen hinsichtlich ihrer lebenszyklusbasierten ökonomischen und ökologischen Potenziale für den bezahlen Wohnungsbau verglichen und bewertet. Analysiert werden dabei zwei verschiedene Baukonstruktionsarten (Kalksandstein und Holz-Hybrid-Konstruktion). Darüber hinaus werden verschiedene mögliche Energieerzeugungsarten sowie Wärmeübergabesysteme der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) untersucht.

Zur ganzheitlichen Bewertung der ökologischen Aspekte eines Gebäudes ist ein lebenszyklusbasierter Ansatz notwendig, bei dem alle relevanten Inputs und Outputs hinsichtlich der Umweltfolgekosten und des Energie- und Ressourcenverbrauchs ermittelt werden. Basierend auf den Projektergebnissen werden Optimierungspotentiale für die Typenhäuser entwickelt, um unabhängig von Förderinstrumenten nachhaltige Bauprojekte umsetzen zu können. Zudem bieten die Projektergebnisse eine Grundlage zur Diskussion mit Entscheidungsträgern bezüglich der Bezuschussung, bzw. Subventionierung des seriellen lebenszyklusbasierten ökologischen und nachhaltigen Bauens.

Hinsichtlich der Forschungsschwerpunkte werden folgende Ziele definiert:

- Darstellung und Aufbereitung der optimierten energetischen und ökologischen Potenziale für den geförderten Wohnungsbau.
- Darstellung der ökologischen Potenziale.
- Datenaufbereitung und Variantenstudie der zu untersuchenden Typenhäuser hinsichtlich der Lebenszyklusanalyse und den Umweltfolgekosten.
- Datenaufbereitung und Variantenstudie zu den zu untersuchenden möglichen Konfigurationen der Baukonstruktion und technischen Gebäudeausrüstung.

2.2. Beschreibung des Fallbeispiels

Bei dem Fallbeispiel handelt es sich um ein Wohngebäude, das als Typenhaus für den geförderten Wohnungsbau entwickelt und geplant wurde. Das Typenhaus kennzeichnet sich durch vordefinierte und geplante Wohn- und Bauelemente. Dies hat den Vorteil, dass das Gebäude individualisiert werden kann, aber dennoch die Planungsabstimmungen deutlich reduziert sind. Des Weiteren führt die Elementbauweise dazu, dass die Bauzeit verkürzt und die Ausführungsqualität erhöht wird. Der wesentliche Vorteil der Bauzeitverkürzung besteht darin, dass eine jahreszeitunabhängigere Umsetzung des Gebäudes ermöglicht wird.

Darüber hinaus unterliegt die Entwicklung der Typenhäuser den Anforderungen des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr, welche eine Baukostenobergrenze von 2.250 € pro m² Wohnfläche (für die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 [4]) angibt [5].

Das Gebäude ist nicht unterkellert, weswegen die Bodenplatte, die Außenwände sowie das Dach die thermische Gebäudehülle bilden. Im Gebäude selbst werden alle Zonen, als auf normale Temperaturen beheizte Bereiche angesehen.

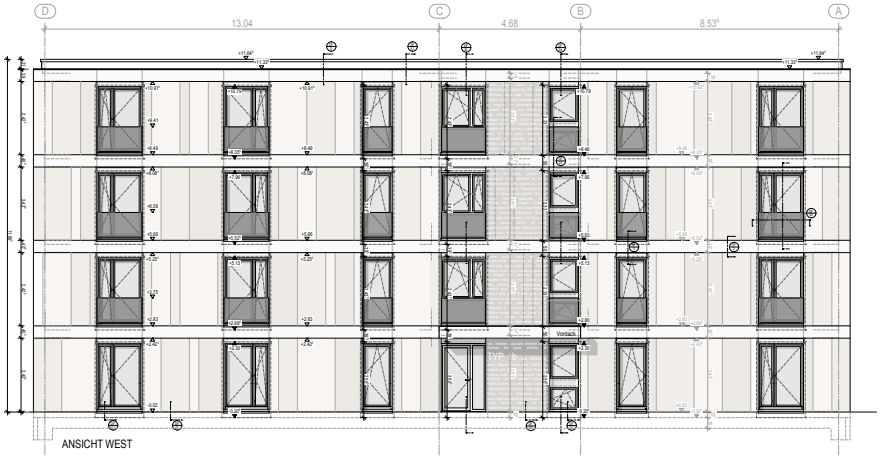


Abbildung 1 Darstellung des Typenhauses

Für das vorliegende Bauvorhaben wurden folgende relevante Bezugsgrößen aus dem Nachweis gemäß Gebäudeenergiegesetz entnommen [6]:

- Fläche der thermischen Gebäudehülle: A = 1.605 m²
- Bruttovolumen: Ve = 3.836 m³
- Luftvolumen: V = 3.299 m³
- Nettogrundfläche: ANGF = 1.228 m²
- Fensterflächenanteil: ca. 29 %
- A/Ve-Verhältnis: A/Ve = 0,42 m-1

2.3. Baukonstruktion

Das Typenhaus wird in zwei grundlegenden Ausführungen untersucht. Hierzu zählt eine Massivbauweise aus Kalk-Sandstein und eine Holz-Hybrid-Variante. Die charakteristischen Eigenschaften der Baukonstruktion beider Varianten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Beschreibung der baukonstruktiven Eigenschaften

	Massivbauweise	**Holz-Hybrid**
Außenwand	Tragkonstruktion aus Kalk-Sandstein mit außenliegendem Wärmedämmverbundsystem (EPS)	Vorgefertigte Holzelemente mit zwischenliegender Wärmedämmung (MW)
	10 mm Innenputz	Beplankung mit Gipskarton
	180 mm Kalk-Sandstein	OSB-Platte
	175 mm Wärmedämmverbundsystem	200 mm Holzständer mit Gefachdämmung aus Mineralwolle
	10 mm Außenputz	Außenseitige Bekleidung Außenputz
	U = 0,18 W/m²K	U = 0,16 W/m²K
Bodenplatte	Oberseitig gedämmte Stahlbetonbodenplatte mit schwimmendem Estrich	Oberseitig gedämmte Stahlbetonbodenplatte mit schwimmendem Estrich
	65 mm Zementestrich	65 mm Zementestrich
	20 mm Trittschalldämmung (EPS)	30 mm Trittschalldämmung (EPS)
	100 mm Wärmedämmung (EPS)	50 mm Wärmedämmung (EPS)
	250 mm Stahlbetonbodenplatte	250 mm Stahlbetonbodenplatte
		100 mm Wärmedämmung (XPS)
	U = 0,28 W/m²K	U = 0,28 W/m²K
Dach	Stahlbetondecke mit einem Warmdachaufbau und einer extensiven Begrünung	Holz-Beton-Verbunddecke mit einem Warmdachaufbau und einer extensiven Begrünung
	Gründachaufbau	Gründachaufbau
	Abdichtung	Abdichtung
	280 mm Wärmedämmung	260 mm Wärmedämmung
	Dampfsperre	Dampfsperre
	220 mm Stahlbetondecke	200 mm Beton
		100 mm Brettschichtholz
	U = 0,14 W/m²K	U = 0,13 W/m²K
Geschossdecken	Stahlbetondecken mit schwimmendem Estrich mit druckfester Wärmedämmung aus EPS	Holz-Beton-Verbunddecken mit schwimmendem Estrich mit druckfester Wärmedämmung aus MW
	65 mm Zementestrich	65 mm Zementestrich

Tabelle 1 Beschreibung der baukonstruktiven Eigenschaften

	Massivbauweise	**Holz-Hybrid**
	30 mm Trittschalldämmung (EPS)	40 mm Trittschalldämmung (MW)
	50 mm Wärmedämmung (EPS)	140 mm Beton
	220 mm Stahlbetonbodenplatte	80 mm Brettschichtholz
Fenster	Zweifach-Isolierverglasung mit einem thermische getrennten Rahmenprofil aus Kunststoff.	Zweifach-Isolierverglasung mit einem thermische getrennten Rahmenprofil aus Holz.
	Uw = 1,3 W/m²K	Uw = 1,3 W/m²K
	Gesamtenergiedurchlassgrad: g = 0,60	Gesamtenergiedurchlassgrad: g = 0,60
Innenwand (massiv)	Massivwand aus Kalk-Sandstein	Massivwand aus Stahlbeton
	10 mm Innenputz	10 mm Innenputz
	240 mm Kalk-Sandstein	250 mm Stahlbeton
	10 mm Innenputz	10 mm Innenputz
Innenwand (leicht)	Leichte Innenwände aus GK-Ständerwänden	Systemwand aus Holz-Ständer-werk
	2 x 18 mm Gipskartonplatten	2 x 18 mm Gipskartonplatten
	100 mm Metallständerwerk mit Mineralfasereinlage	120 mm Holz-Ständerwerk mit Mineralwolleeinlage
	Mineralfasereinlage	Mineralwolleeinlage
		20 mm Trennfuge
		120 mm Holz-Ständerwerk mit Mineralwolleeinlage
	2 x 18 mm Gipskartonplatten	2 x 18 mm Gipskartonplatten

2.4. Technische Gebäudeausrüstung

Das Ziel der eingesetzten Technischen Gebäudeausrüstung ist es den Energiebedarf so gering wie möglich zu halten. Die energetische Versorgung wird dabei über die Fernwärme der N-ERGIE AG Nürnberg realisiert, wobei die Fernwärme zum einen aus einer erdgasgefeuerten Gas-und-Dampfturbinen-Anlage sowie einem Biomasse-Heizkraftwerk (BMHKW) erzeugt wird. Die Wärmeübergabe im Gebäude erfolgt über eine Fußbodenheizung. Das Lüftungssystem besteht aus einer dezentralen mechanischen Belüftung in den Sanitärräumen. Die Nachströmung erfolgt über Außenluftdurchlässe in den Wohnräumen.

Im Folgenden ist die eingesetzte Anlagentechnik zusammengefasst:

Heizung / Kühlung
- Heizungsanlage: Fernwärme der N-ERGIE AG Nürnberg
- Primärenergiefaktor: fp = 0,00
- Emissionswert: 0,0 kg CO_2-Äq./kWh
- Wärmeübergabe: Fußbodenheizung, Systemtemperaturen 45 °C / 35 °C
- Speicher: Volumen 900 l

Warmwasser
- Versorgung: Elektro-Durchlauferhitzer

Lüftung
- System: Abluft in den Sanitärräumen

III. Methodisches Vorgehen

3.1. Grundlagen

Um konkrete Umsetzungsstrategien für die Optimierung der Typenhäuser zu entwickeln und darzustellen, wird ein lebenszyklusbasierter und multikriterieller Ansatz verwendet. Dargestellt ist dieser Ansatz in Abbildung 2. Aufgebaut wird auf dem bestehenden architektonischen Entwurf eines ausgewählten Typenhauses, siehe Kapitel 2.2.

Der multikriterielle Bewertungsansatz besteht aus den Komponenten Klimaschutz, Umweltschutz und den Umweltkosten (siehe Tabelle 2). Grundlage für diesen Bewertungsansatz sind Lebenszyklusanalysen (LCA) mit denen der Einsatz stofflicher und energetischer Ressourcen und deren Umweltwirkungen ermittelt werden können.

Der Klimaschutz wird dabei anhand der ermittelten Treibhausgasemissionen (THG) in kg CO_2-Äq. bewertet. Darauf aufbauend wird der Umweltschutz anhand des ökologischen Flächenbedarfs bewertet. Der ökologische Flächenbedarf (en: Ecological Land Demand - ELD) stellt eine Methode zur Ermittlung der beanspruchten natürlichen Ökosystemen wie beispielsweise Wälder und natürliches Grünland dar [7]. Innerhalb dieser Methode können die Umweltindikatoren Treibhauspotenzial (GWP in kg CO_2-Äq.), Versauerungspotenzial (AP in kg SO_2-Äq.) und Eutrophierungspotenzial (EP in Phosphat-Äq.) bewertet werden.

Darüber hinaus werden basierend auf den THG die resultierenden Umweltkosten ermittelt. Umweltkosten stellen diejenigen Kosten dar, die aufgrund von Umweltschäden und dem Klimawandel entstehen und bisher durch die Gesellschaft getragen werden. Für die Berechnung der Umweltkosten werden verschiedenste Kostensätze verwendet. Ein Beispiel hierfür ist der Mindestkostensatz gemäß dem Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung. Die Kosten für eine Tonne CO_2 wurden für das Jahr 2021 mit 25 €/t CO_2 angesetzt und steigen gemäß Koalitionsvertrag bis zum Jahr 2026 auf maximal mit 60 €/t CO_2 [8]. Über diese eher konservative Besteuerung der Umweltkosten hinausgehend, gibt das Umweltbundesamt höhere Kostensätze an. In der Methodenkonvention 3.0 ist ein Kostensatz von 195 €/t CO_2-Äq. definiert. Bei diesem Kostensatz ist eine höhere Gewichtung des Wohlergehens heutiger gegenüber zukünftigen Generationen festgelegt. Bei gleicher Gewichtung zwischen heutiger und zukünftiger Generation wird ein Kostensatz von 680 €/t CO_2-Äq. vorgeschlagen [11].

Tabelle 2 Bewertungskriterien mit den jeweiligen Parametern

Kriterium	Parameter
Klimaschutz	THG in kg CO_2-Äq.
Umweltschutz	Ökologischer Flächenbedarf
Umweltkosten	€/t CO_2

Das methodische Vorgehen zur Ermittlung der betrachteten Komponenten ist in folgender Abbildung 2 dargestellt.

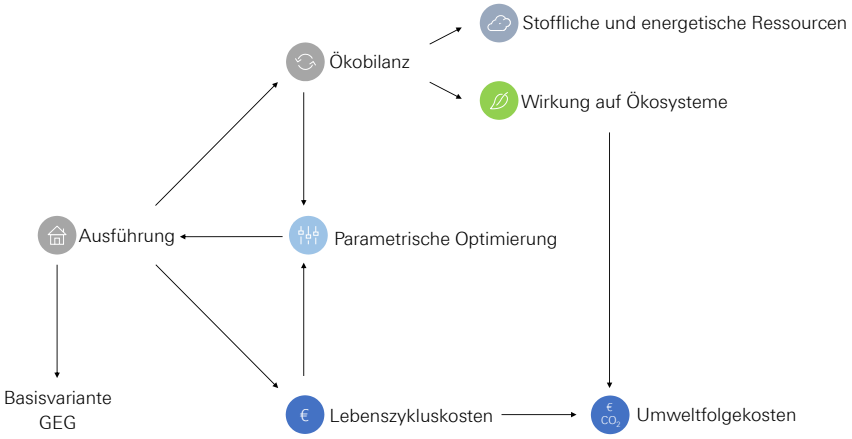


Abbildung 2 Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens

Ausgehend von den Ausführungsvarianten wird im ersten Schritt eine Basisvariante definiert. Die Basisvariante dient dabei als Grundlage zur Bewertung und Vergleich anhand des baurechtlichen Mindeststandards. Die Variante v00 basiert dabei auf dem Referenzgebäude des Gebäudeenergiegesetzes (GEG). Die geometrischen Eigenschaften des Fallbeispiels werden dabei gleich gelassen und die Referenzausführung hinsichtlich der thermischen Gebäudehülle und der Technischen Gebäudeausrüstung nach GEG angesetzt. Im zweiten Schritt werden die beiden Ausführungsvarianten v01 und v02 des Typenhauses bewertet. Anhand der Ausführungsvariante v01 werden Parameter des Gebäudes hinsichtlich ihrer Sensitivität und des Einflusses auf die THG-Emissionen analysiert. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dienen als Grundlage für die parametrische Optimierung, diese wird anschließend mit thermischen Gebäudesimulationen durchgeführt. Eingesetzt werden dabei zwei verschiedene Optimierungsverfahren, zum einen die Partikelschwarmoptimierung (PSO) und zum anderen das Verfahren nach Hooke-Jeeves (HJ).

Im Rahmen des Projektes werden die zwei verschiedenen Bauweisen Kalksandstein und Holz-Hybrid untersucht. Des Weiteren werden die Energiesysteme Gasheizkessel und Fernwärme, Wärmepumpen sowie Photovoltaik (PV) und Solarthermie (ST) bewertet.

Zusammenfassend werden folgende Gebäudevariante untersucht:

- v00: Referenzgebäude nach GEG
- v01: Ausführungsvariante in Massivbauweise
- v02: Ausführungsvariante in Holz-Hybrid
- v03: Parametrisch optimierte Holz-Hybrid Variante
- v04: Parametrisch optimierte Holz-Hybrid Variante inkl. der Anrechnung von erneuerbar erzeugtem Strom durch eine PV-Anlage

3.2. Lebenszyklusanalyse

Die Ökobilanz wird nach DIN EN ISO 14040 [9], DIN EN ISO 14044 [10] und DIN EN 15978 [11] berechnet. Für die Ökobilanz wird die OEKOBAUDAT 2020-II mit spezifischen Datensätzen für Bauprodukte verwendet. Die Ökobilanz dient insbesondere der Ermittlung der Umweltauswirkungen und fungiert als Grundlage für die Berechnung der Umweltfolgekosten. Die ökologischen Auswirkungen des Gebäudes werden für den Wirkungsindikator Global Warming Potential (GWP), angegeben in kg CO_2-Äq., berechnet. Die Gebäudebewertung erfolgt auf Basis der Gebäudelebenszyklusphasen nach DIN EN 15804 [12] für die Lebenszyklusphasen Herstellung (A1-A3), Austausch (B4), Betriebsenergieverbrauch (B6) und Entsorgung (C1-C4). Für die Lebensdauer des Gebäudes werden 50 Jahre angesetzt.

Ein Gebäude ist das Ergebnis aus dem Zusammenfügen verschiedenster Baumaterialien (z. B. Konstruktionsvollholz und/oder Stahlbeton) und technischen Komponenten (z. B. Wärmeversorgungsanlagen), unter der Verwendung verschiedenster Dienstleistungen (z.B. Transport der Materialien und Anlagen).

Die damit einhergehenden stofflichen und energetischen Input-, Betriebs- und Outputflüsse sowie die damit direkt und indirekt verknüpften Umwelteinwirkungen während des gesamten Lebenszyklus – von der Gewinnung der Ausgangsrohstoffe bis zum Recycling – können mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse (en.: Life Cycle Assessment – LCA) bewertet werden.

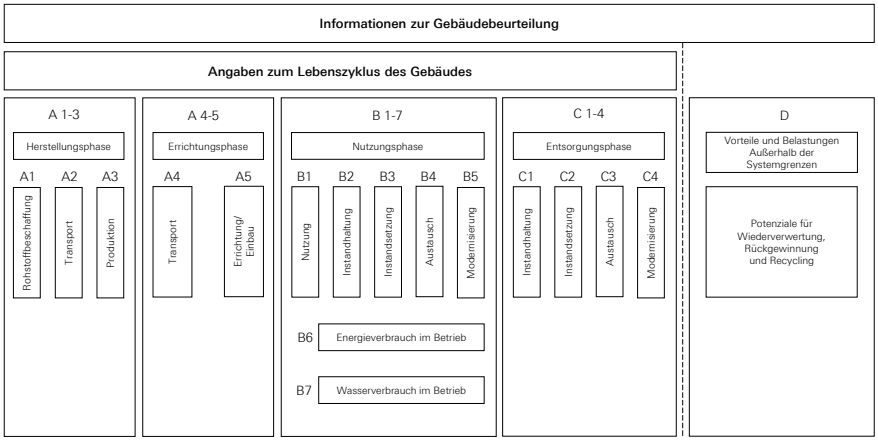


Abbildung 3 Berücksichtigte Lebenszyklusphasen des Gesamtgebäudes nach DIN EN 15978 für LCA und LCC [11]

Abbildung 3 zeigt die Lebenszyklusphasen, die in diesem Projekt innerhalb der Ökobilanzierung (LCA) und Lebenszykluskostenanalyse (LCC) berücksichtigt wurden. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Methoden der LCA und LCC näher erläutert.

Zusammenfassend werden folgende Lebenszyklusphasen berücksichtigt:

- Herstellung (A1-A3)
- Austausch (B4)
- Energieverbrauch im Betrieb (B6)
- Abfallbehandlung und -beseitigung (C3-C4)
- Recyclingpotential (D)

Bei der parallelen Betrachtung der ökologischen Qualität und den Umweltfolgekosten von Bauprojekten ist es sinnvoll auf bekannte und einheitliche Bauteildefinitionen zurückzugreifen. Im Fokus der Bilanzierungen stehen dabei nur die gebäudebezogenen Kostengruppen der KG 320 bis 360 (Gründung, Außenwände, Innenwände, Decken, Dach) und KG 420 (Wärmeversorgungsanlagen) und KG 440 (PV-Anlagen), um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Bauprojekten zu gewährleisten.

3.3. Thermische Gebäudesimulation

Mit Hilfe von thermischer Gebäudesimulation können Gebäude unter Berücksichtigung des architektonischen Entwurfs, der Bauphysik, der Technischen Gebäudeausrüstung, der Nutzenden und des dynamischen Außenklimas analysiert werden. Dabei wird insbesondere das zeitliche Verhalten der Raumtemperaturen, die Heizung, Lüftung und Kühlung als auch das energierelevante Verhalten der Nutzenden abgebildet und berechnet. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird die Berechnung der Lebenszyklusanalyse (bzw. die Berechnungen für das THG) in eine bestehende Simulationssoftware (IDA ICE der Firma EQUA) implementiert. Dies ermöglicht parametrische Analysen und Optimierungen über den gesamten Lebenszyklus unter Berücksichtigung der grauen Emissionen der Baukonstruktion und der Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung.

Im ersten Schritt werden verschiedenste Gebäudeparameter hinsichtlich ihrer Sensitivität gegenüber dem GWP über den gesamten Lebenszyklus analysiert. Berücksichtigt werden dabei alle definierten Lebenszyklusphasen. Die Sensitivitätsanalyse basiert dabei auf der Variante v01 (Ausführungsvariante in Massivbauweise). Zur Ermittlung und Analyse der Sensitivität wird die lokale Sensitivitätsanalyse one-step-at-a-time Methode (OAT)-Methode verwendet. Ein großer Vorteil dieser Methode besteht in den geringen Berechnungszeiten sowie der Tatsache, dass der Einfluss bzw. die Variation der Zielgröße (z. B. der Energiebedarf) direkt erkennbar sind.

Die Sensitivitätsanalyse dient dabei den folgenden Aspekten:

- Identifikation von Parametern mit hohem/niedrigen Einfluss auf das GWP
- Reduktion der Simulationsdauern durch die Reduktion der zu optimierenden Parametern

Darauf aufbauend werden Optimierungsverfahren zur lebenszyklusbasierten Optimierung des Typenhauses verwendet. Eingesetzt werden dabei zwei verschiedene Optimierungsverfahren: zum einen die Partikelschwarmoptimierung und zum anderen das Verfahren nach Hooke-Jeeves. Für die Optimierungen wird das lebenszyklusbasierte GWP für Baukonstruktion, Technische Gebäudeausrüstung und Nutzung des Gebäudes definiert.

3.4. Umweltfolgekosten

Basierend auf den bei der Lebenszyklusanalyse errechneten Emissionen (GWP) lassen sich die Umweltfolgekosten, bzw. Emissionskosten errechnen.

Hierfür wird das bei der Lebenszyklusanalyse (siehe Kapitel 3.2) errechnete GWP mit den Emissionskosten pro Tonne CO_2-Äquivalente multipliziert. Als Ausgangswert zur Berechnung der Emissionskosten werden die von der Bundesregierung für das Jahr 2021 angesetzten 25 €/t CO_2 für die Berechnungen herangezogen. Zudem wurden in verschiedensten Szenarien die Auswirkung der Steigerung der Kostenwerte analysiert:

- 60 €/t CO_2 nach Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP

- 190 €/t CO_2 Umweltbundesamt (Höhergewichtung der Wohlfahrt der heutigen Generation gegenüber der Wohlfahrt künftiger Generationen)

- 680 €/t CO_2 (Gleichgewichtung der Wohlfahrt der Generationen)

Für die Interpretation der Ergebnisse ist jedoch anzumerken, dass bislang gesetzlich nicht geklärt ist, wie sich die Kosten auf bspw. Material- und Komponentenhersteller:innen, Bauherr:innen, Gebäudeeigentümer:innen, Mieter:innen, etc. verteilen. Die im Ergebnisteil aufgeführten Kostenwerte berücksichtigen somit keine spezifischen Kostenverteilungen, sondern stellen lediglich einen szenarienbasierte Kostenvergleich dar.

3.5. Ökologischer Flächenbedarf

In Bezug auf den Umweltschutz stellt der ökologische Flächenbedarf (ELD) ein Indikator dar, mit dem die aufgrund von Gebäudeemissionen beanspruchten natürlichen Ökosystemen ermittelt und dargestellt werden können. Die Berechnung des ELD basiert dabei auf Lebenszyklusanalysen und verknüpft diese systematisch mit ökosystem-spezifischen Kennwerte. Entwickelt wurde diese Methode im Rahmen der Dissertation von Michael Vollmer am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen. Publiziert wurde diese Methode im Rahmen der Building Simulation Konferenz 2021 in Brügge, Belgien [7]. Eine der wesentlichen Grundlagen dieser Methode stellt die Eigenschaft von Ökosystemen dar, Emissionen auf biochemischer Ebene zu verarbeiten. Die einzelnen methodischen Schritte in der Ermittlung des ELD sind:

- Berechnung der Umweltindikatoren GWP, AP und EP mittels Lebenszyklusanalysen

- Ermittlung der natürlichen Bindungskapazitäten von Ökosystemen

- Verteilung der Emissionen (GWP, AP und EP) auf die Ökosysteme anhand deren Flächenverteilung

- Ermittlung der einzelnen Flächenbedarfe in Bezug auf GWP, AP und EP sowie den verschiedenen Ökosystemen

- Zur Vermeidung einer doppelten Anrechnung des Flächenbedarfs wird pro Ökosystem jeweils der maximal resultierende ELD aus GWP, AP und EP für die Berechnung des Gesamt ELDs verwendet.

Berücksichtigt werden, wie bereits beschrieben, die Umweltindikatoren Treibhauspotenzial GWP, Versauerungspotenzial AP und Eutrophierungspotenzial EP. Die Ermittlung der Bindungskapazitäten von Ökosystemen basiert auf den folgenden zwei Konzepten:

- Konzept der Kohlenstoffdioxid-Assimilation für GWP

- Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen (CL) für EP und AP

Konzept der Kohlenstoffdioxid-Assimilation

Die Kohlenstoffdioxid-Assimilation ist der biochemische Vorgang in Ökosystemen, der die Bindung von Kohlenstoff beschreibt. Bei Pflanzen stellt die Photosynthese den bedeutendsten Prozess im Kontext dessen dar. Hierbei wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) unter Verwendung von Sonnenenergie zu Traubenzucker ($C_6H_{12}O_6$), Sauerstoff (O_2) und Wasser (H_2O) umgewandelt. Die Kenndaten zu den Bindungskapazitäten basieren auf Literaturkennwerten [13–17].

Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen (Critical Load - CL)

Für die Wirkungsindikatoren AP und EP wird das Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen (en: Critical Load - CL) verwendet. Dieser Ansatz wurde im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (LRTAP-Konvention) der europäischen Wirtschaftskommission (United Nations Economic Commission for Europe) entwickelt [18]. Er soll dazu dienen, Ökosysteme vor zu hohen Einträgen durch Luftschadstoffe zu schützen. Definiert sind die CL als „Eine quantitative Schätzung der Schadstoffbelastung gegenüber einem oder mehreren Schadstoffen, unterhalb derer nach derzeitigem Kenntnisstand keine signifikanten schädlichen Auswirkungen auf bestimmte empfindliche Elemente der Umwelt auftreten“ [19]. Der bundesweit geltende Datensatz mit spezifischen Kennwerten zu den einzelnen Ökosystemen wurde vom Umweltbundesamt veröffentlicht [20].

Zur Ermittlung sind die einzelnen Flächen sowie deren relativen Anteile erforderlich, um eine gleichmäßige Verteilung der Emissionen auf die einzelnen Ökosysteme zu gewährleisten.

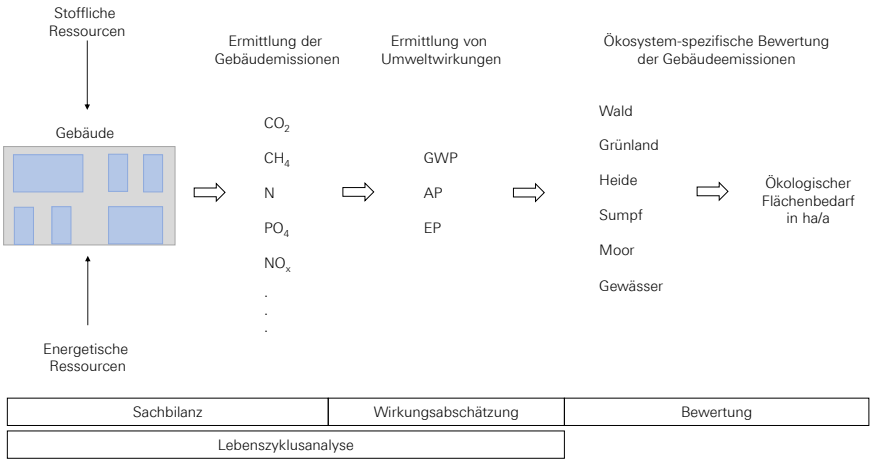


Abbildung 4 Darstellung der Bewertungsmethode zum ökologischen Flächenbedarf (eigene Darstellung)

Der mathematische Sachverhalt in der Kombination der zuvor beschrieben Daten ist in der Publikation von Vollmer et al. [7] beschrieben.

IV. Ergebnisse

4.1. Ökobilanzierung der Ausführungsvarianten

Die Ökobilanz für das Treibhauspotenzial (GWP in kg CO_2-Äq.) zu den beiden Ausführungsvarianten v01 (Massivbauweise) und v02 (Holz-Hybrid) sind in der folgenden Abbildung 5 dargestellt. Die Ergebnisse umfassen die baukonstruktiven Komponenten der Außenwand, Bodenplatte, Dach, Decke, Fenster und die Innenwände.

Es zeigt sich, dass durch den erhöhten Anteil an nachwachsenden Rohstoffen das GWP, das durch die Außenwand verursacht wird, deutlich reduziert werden kann. Die Summe über alle betrachteten Lebenszyklusphasen (A bis C, mit Ausnahme der Nutzungsphase B6 und ohne Recyclingpotenzial aus Modul D) ergeben für die Außenwand der Variante v02 insgesamt 29.696 kg CO_2-Äq. und für v01, 81.881 kg CO_2-Äq. Dies entspricht einer potenziellen Reduktion von -64 % (52.186 kg CO_2-Äq).

Die Bodenplatte weist in den beiden betrachteten Varianten keine Unterschiede auf, da die Bodenplatte in beiden Fällen aus Stahlbeton umgesetzt ist.

Des Weiteren zeigen sich für das Dach weitere Reduktionspotenziale. Das Dach weist in v01 ein GWP von 69.871 kg CO_2-Äq. und in v02 ein GWP von 54.062 kg CO_2-Äq. auf. Dies entspricht einer weiteren Reduktion von -77 % (15.809 kg CO_2-Äq.).

Zudem weisen die Fenster große Einsparpotenziale von -43 % auf. Hierbei ergibt sich eine Differenz von 29.531 kg CO_2-Äq. (v01: 68.180 kg CO_2-Äq. und v02: 38.648).

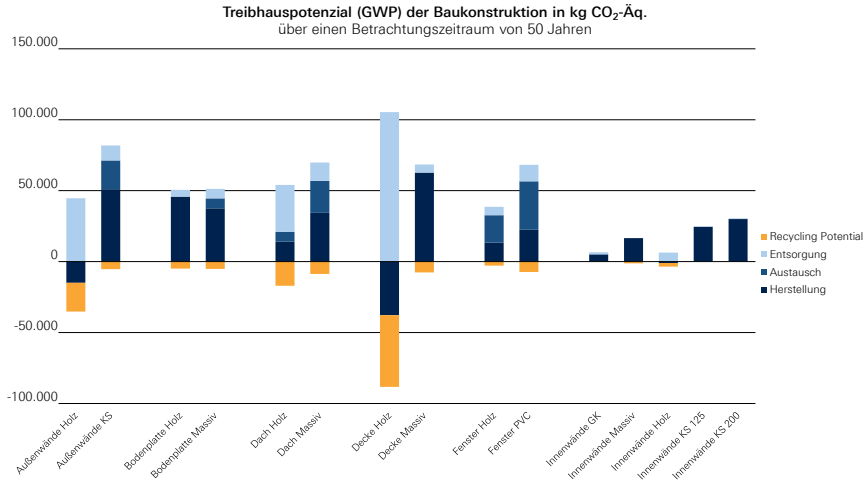


Abbildung 5 THG der beiden Ausführungsvarianten v01 (Massivbauweise in Kalk-Sand-Stein) und v02 (Holz-Hybrid-Bauweise)

Für die gesamte Baukonstruktion ergeben sich für Variante v00 ein GWP von 380.945 kg CO_2-Äq., für Variante v01 von 395.105 kg CO_2-Äq. und für Variante v02 von 269.148 kg CO_2-Äq. (siehe Abbildung 6).

Dass die Variante v01 ein höheres GWP als v00 aufweist, liegt an dem höheren Wärmedämmstandard und dem damit verbundenen Mehraufwand für Material und der sich hieraus ergebenden grauen Energie. In Bezug auf die Holz-Hybride Bauweise, zeigt v01 im Vergleich zu v00 ein um 111.797 kg CO_2-Äq.

und im Vergleich zu v01 ein 125.958 kg CO_2-Äq. geringeres GWP auf. Dies entspricht einer Reduktion um 29 % bzw. 32 %.

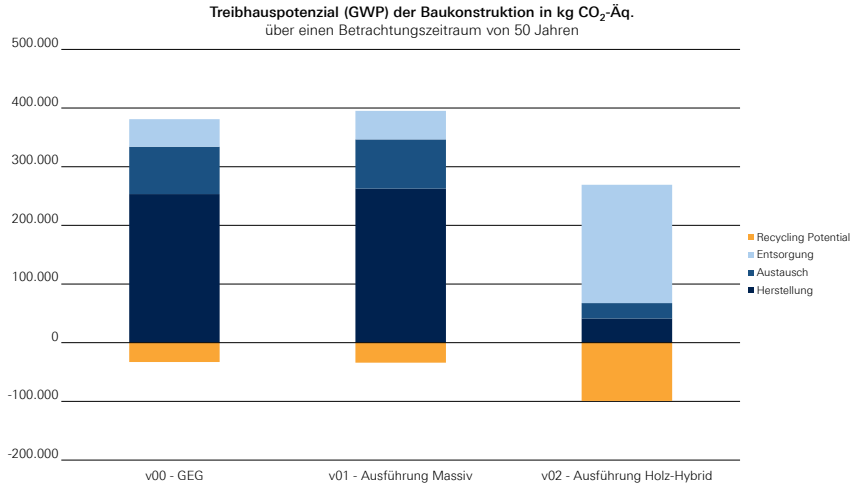


Abbildung 6 Vergleich der THG zwischen der Massivbauweise und der Holz-Hybrid Variante

Unter Berücksichtigung der Baukonstruktion, Nutzungsphase und den Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung ergibt sich für den gesamten Betrachtungszeitraum und für die jeweiligen Gesamtgebäude für v00 ein GWP von 1.445.758 kg CO_2-Äq., für v01 von 986.953 kg CO_2-Äq. und für v02 von 860.996 kg CO_2-Äq., (siehe Abbildung 7).

Die Differenz zwischen v01 und v02 ergibt sich ausschließlich durch die Gebäudekonstruktion, da die Wärmebereitstellung und die Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung in beiden Varianten das gleiche GWP aufweisen. Dies liegt daran, dass in beiden Fällen, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, die Gebäude über einen Fernwärmeanschluss an das N-ERGIE Netz verfügen. Für die hierbei bereitgestellte Wärme wird ein CO_2-Emissionsfaktor von 0 kg CO_2-Äq./kWh angesetzt. Die dargestellten CO_2-Emissionen für die Nutzungsphase ergeben sich ausschließlich aus den Energiebedarfen für Warmwasser und Beleuchtung. Im Vergleich zur Grundvariante v00 weisen die Ausführungsvarianten eine Differenz von -32 % (-458.805 kg CO_2-Äq.) (v01) und -40 % (-584.763 kg CO_2-Äq.) (v02) auf.

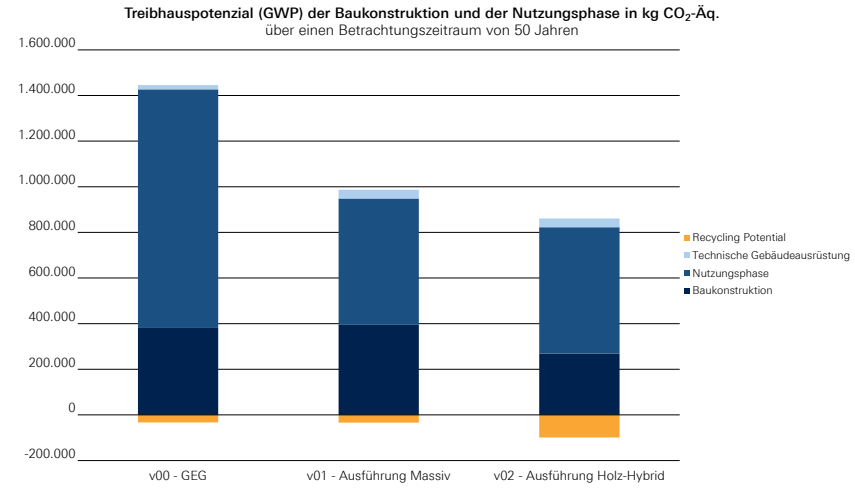


Abbildung 7 GWP der Baukonstruktion, Nutzungsphase und TGA über den gesamten Betrachtungszeitraum

Zusammenfassend sind die Ergebnisse für das GWP für die Basisvariante und die Ausführungsvarianten in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3 Kennwerte der LCA für GWP der drei Grundvarianten

	GWP in kg CO2-Äq.		
	v00	v01	v02
Baukonstruktion	380.944	395.105	269.148
Nutzung	1.046.021	553.484	553.484
Technische Gebäudeausrüstung	18.791	38.364	38.364
Recyclingpotenzial	-32.812	-34.038	-99.328

4.2. Ökobilanzierung der parametrischen Optimierung

Die Sensitivität der untersuchten Parameter (z. B. die Dicke der Wärmedämmung) auf das lebenszyklusbasierte GWP des Gesamtgebäudes ist für die Variante v01 in Abbildung 8 dargestellt. Dabei zeigt sich aufgrund der Bandbreite der einzelnen Parameter, dass die Dicke der Wärmedämmungen der Außenwand, Dach und Bodenplatte (d_WD_AW, d_WD_DA und d_WD_G) einen großen Einfluss auf das GWP hat.

Des Weiteren zeigt sich, dass die Parameter g_FE (Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung), PV_A (Fläche der Photovoltaikanlage), ST_A (Fläche der Solarthermieanlage), Uw (U-Wert der Fenster), V_tank_hot (Volumen des Warmwassertanks) und besonders das Energiesystem einen signifikanten Einfluss auf das GWP haben.

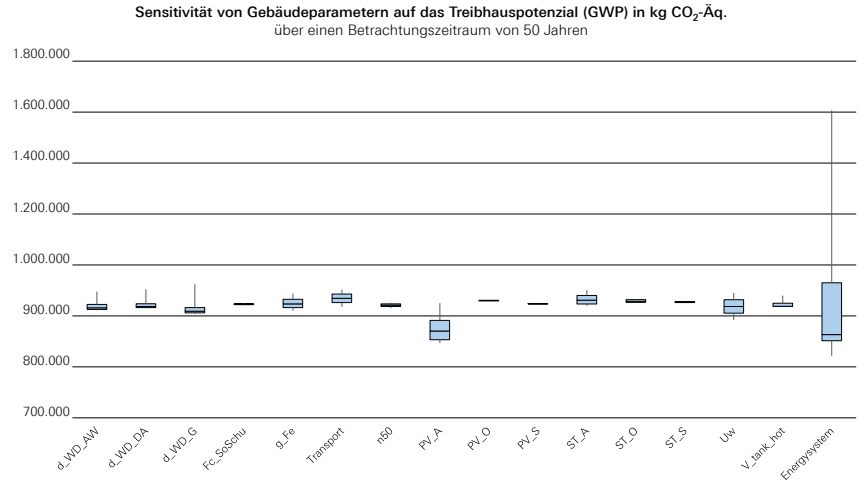


Abbildung 8 Sensitivitätsanalyse GWP für Variante v01

Da die aufgeführten Parameter einen großen Einfluss und damit ein großes Potenzial zur Reduktion des GWP aufweisen, werden diese in der parametrischen Optimierung berücksichtigt.

Um das Ziel eines möglichst geringen lebenszyklusbasierten GWP für die definierten Typenhäuser zu erreichen, wird basierend auf den Erkenntnissen der Lebenszyklusanalyse (siehe Kapitel 4.1), die Optimierung für die Holz-Hybrid Bauweise durchgeführt. Die Holz-Hybrid Bauweise, weist im Vergleich zur Massivbauweise, wie bereits dargestellt ein geringeres GWP auf. Um eine Übertragbarkeit auf andere Projekte zu gewährleisten, wird in der Optimierung ein Durchschnittsdatensatz für die Fernwärme in Deutschland angesetzt.

Das Ergebnis der parametrischen Optimierungen sind in der folgenden Tabelle 5 dargestellt.

Für die optimierten Parameter ergeben sich Wärmedämmstoffdicken für die Außenwand von 28 cm, für das Dach von 26 cm und für die Bodenplatte von 20 cm. Hinsichtlich der Wärmedämmstoffdicken stellen die dargestellten Dicken den optimalen Punkt zwischen eingesparter Energie der Nutzungsphase des Gebäudes und der grauen Energie, die in den Materialen steckt, dar. Höhere Wärmedämmstoffdicken würden zwar zu einer weiteren Reduktion des Energiebedarfs führen, allerdings übersteigen die hiermit verbundenen grauen Energien bzw. Emissionen die Potenziale in der Energieeinsparung. Die Folge hieraus wäre, dass die gebäudebezogenen Emissionen steigen würden. Dabei zeigen sich die Vorteile der lebenszyklusbasierten Betrachtung im Vergleich zur limitierten Betrachtung, wie dies derzeit beispielsweise gemäß GEG üblich ist.

Des Weiteren ergibt sich als präferierende Variante für die Fenster eine Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von U = 0,60 W/m²K und einem Gesamtenergiedurchlassgrad von g = 0,55. Zur Reduktion des Energiebedarfs und hinsichtlich der Nutzung von erneuerbaren Energiequellen ergeben sich für die Photovoltaikanlage eine Fläche von 55 m² und für die Solarthermieanlage von 10 m².

Tabelle 4 Optimierte Gebäudeparameter

Bezeichnung	Parameter	Optimierter Wert
d_WD_AW	Dicke Wärmedämmung Außenwand	0,28 m
d_WD_DA	Dicke Wärmedämmung Dach	0,26 m
d_WD_G	Dicke Wärmedämmung Bodenplatte	0,20 m
g_FE	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung	0,55
Uw	U-Wert Fenster	0,60
Fc	Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes	0,55
PV_A	Fläche Photovoltaikanlage	55 m²
ST_A	Fläche Solarthermieanlage	10 m²
V_tank_hot	Volumen Warmwassertank	0,5 m³

Die Anwendung der optimierten Gebäudeparameter auf die Ausführungsvariante v03 ergibt die optimierte Variante v04. Die Ergebnisse zum Treibhauspotenzial sind in Abbildung 9 dargestellt.

Hier zeigt sich, dass sich für die Baukonstruktion ein gesamtes GWP von 244.590 kg CO_2-Äq., für die Nutzungsphase von 296.012 kg CO_2-Äq. und für die Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung von 49.090 kg CO_2-Äq. ergibt.

Bezogen auf die Baukonstruktion weisen die Decken den größten Anteil mit insgesamt 67.580 kg CO_2-Äq. auf. Die weiteren Anteile entfallen auf die Fenster mit 49.034 kg CO_2-Äq., die Bodenplatte mit 45.080 kg CO_2-Äq., das Dach mit 34.761 kg CO_2-Äq., die Außenwand mit 19.554 kg CO_2-Äq., sowie die massiven Innenwände mit 16.649 kg CO_2-Äq. und die leichten Innenwände mit 11.932 kg CO_2-Äq.

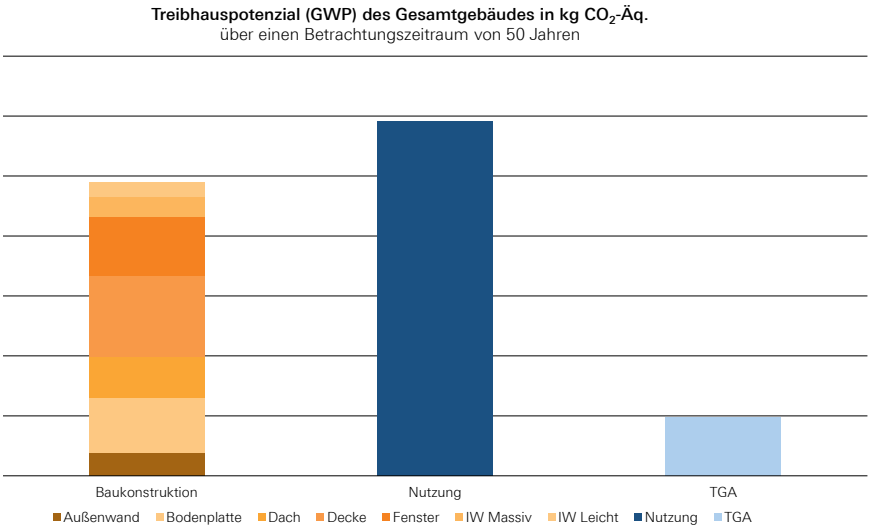
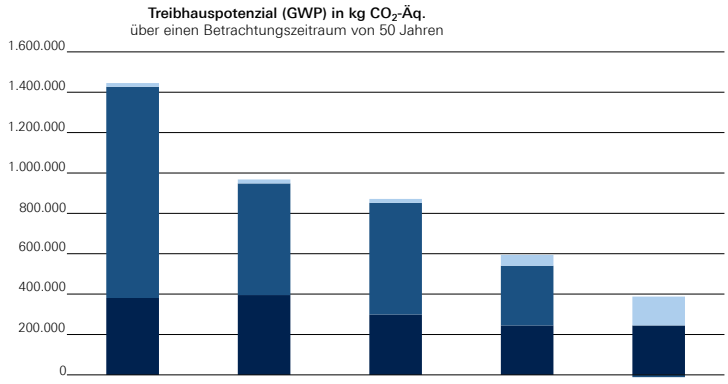


Abbildung 9 Treibhauspotenzial in kg CO_2-Äq. für die optimierte Gebäudevariante v04 getrennt nach Baukonstruktion, Nutzungsphase und Technische Gebäudeausrüstung

4.3. Anrechnung von erneuerbar erzeugtem Strom

In der letzten untersuchten Variante (v04) wird untersucht welchen Einfluss die Anrechnung von auf dem Grundstück erzeugtem erneuerbar Strom auf die Ökobilanz hat.

Hinsichtlich der Klimaneutralität besteht die Möglichkeit überschüssige erneuerbare Energie als Gutschrift dem Gebäude anzurechnen. Dabei wird fossiler, nicht-erneuerbarer Strom durch die Einspeisung von regenerativ erzeugtem Strom in das Stromnetz verdrängt. Unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen nutzen die Optimierungsalgorithmen die maximal definierte Fläche (200 m²) für PV. Durch die Nutzung des regenerativ erzeugten Stroms und die Einspeisung der überschüssigen Energie in das Netz kann rechnerisch eine CO_2-positive Nutzungsphase erreicht werden (siehe Abbildung 10, Variante v04). Dadurch, dass in Variante v04 eine größere PV-Anlage verbaut ist, erhöht sich dabei das GWP für die Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung. Bezogen auf die Vergleichsvarianten nach GEG (v00) und der Basisvarianten (v01 und v02) wird eine Reduktion des GWP von -74 % (v00), -61 % (v01) bzw. -55 % (v02) erreicht.



	v00	v01	v02	v03	v04
Technische Gebäudeausrüstung	18.792	19.466	19.466	53.759	142.995
Nutzungsphase	1.046.022	553.484	553.484	296.012	-11.435
Baukonstruktion	380.945	395.099	298.671	244.590	244.590

Abbildung 10 Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen der untersuchten Varianten hinsichtlich des Treibhauspotenzials in kg CO_2-Äq.

4.4. Ökologischer Flächenbedarf

Der ökologische Flächenbedarf wird auf Basis der zuvor dargestellten Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse ermittelt. Die Ergebnisse zu den ökologischen Flächenbedarfen sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Flächenbedarfe sind dabei getrennt nach den Ökosystemen und den Varianten dargestellt.

Anhand der untersuchten Gebäudevarianten ergibt sich für die Basisvariante v00 (GEG) ein gesamter Flächenbedarf von 3,08 ha/a. Dieser Flächenbedarf bedeutet, dass jährlich 3,08 ha der bestehenden bundesweiten Ökosysteme beansprucht werden. In Bezug zu den beiden Ausführungsvarianten ergibt sich für die Massivbauweise (v01) ein Flächenbedarf von 2,08 ha/a und für die Holz-Hybridvariante 1,82 ha/a. Es zeigt sich, dass die Ausführungsvarianten ein Umweltentlastungspotenzial gegenüber der Basisvariante von -1,00 ha/a (v01) und -1,26 ha/a (v02) aufweisen. Weiteres Umweltentlastungspotenzial ergibt sich aus den optimierten Varianten, diese weisen einen ökologischen Flächenbedarf von 1,23 ha/a (v03) und 0,80 ha/a (v04) auf. Anhand der dargestellten Ergebnisse zeigt sich, dass sich die größten Flächenbedarfe für das Ökosystem Wald und Grünland ergeben. Dies lässt sich durch zwei Aspekte begründen. Im Rahmen der Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs werden die Emissionen gleichmäßig auf die Ökosysteme in Deutschland verteilt und da Wälder bundesweit die größten flächenbezogenen Ökosysteme darstellen, ergibt sich hierfür auch der größte Flächenbedarf.

Tabelle 5 Ökologischen Flächenbedarfe der untersuchten Gebäudevarianten

	Ökologischer Flächenbedarf in ha/a						
	Wald	**Grünland**	**Heide**	**Sumpf**	**Moor**	**Gewässer**	**Gesamt**
v00	1,98	0,94	0,04	0,03	0,04	0,04	**3,08**
v01	1,31	0,62	0,03	0,02	0,03	0,06	**2,08**
v02	1,15	0,55	0,02	0,02	0,02	0,07	**1,82**
v03	0,78	0,37	0,02	0,01	0,02	0,03	**1,23**
v04	0,49	0,24	0,01	0,01	0,01	0,04	**0,80**

Grundsätzlich ergibt sich daraus eine große Notwendigkeit Ökosystem besonders zu schützen. Um empfindliche Ökosysteme zu schützen bedarf es der Umsetzung von Maßnahmen zur ökologischen Kompensation und Wiederherstellung von geschädigten Ökosystemen.

Im Rahmen der Bauleitplanung müssen zwar Eingriffe und Schäden an Ökosystemen ermittelt und wiederhergestellt werden, allerdings bezieht sich die Bauleitplanung lediglich auf die Planung und Ausweisung von Baugebieten. Im Rahmen der Planung und Umsetzung von Gebäuden wird aktuell nur der Primärenergiebedarf der Nutzungsphase reglementiert. Wie die Ergebnisse anhand des ökologischen Flächenbedarfs jedoch zeigen, werden durch die Errichtung, Nutzung und den Rückbau von Gebäuden große Flächen an Ökosystemen beeinflusst. Maßnahmen zur Klimaneutralität vernachlässigen hierbei die Wirkung, die Gebäude auf Ökosysteme haben. Das weitreichendere Ziel der Umweltneutralität bzw. ökologisch positive Gebäude erfordert daher die zwingende Umsetzten von ökologischen Kompensationsmaßnahmen.

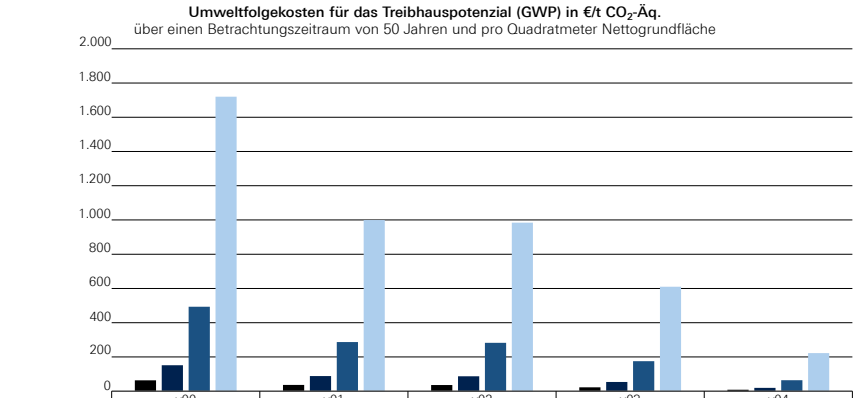
4.5. Einordnung der Ergebnisse anhand der Umweltfolgekosten

Die Ergebnisse zu den Umweltfolgekosten, welche für die Gesellschaft entstehen, wenn Emissionen in unsere Umwelt entlassen werden, sind im Folgenden für den Wirkungsindikator GWP dargestellt.

Für die untersuchten Varianten sind unter Berücksichtigung der verschiedenen Schadenskostensätze die Umweltfolgekosten pro m² Nettogrundfläche dargestellt (siehe Abbildung 11).

Der Schadenskostensatz gemäß dem „Klimaschutzprogramm 2030" der Bundesregierung definiert Kosten zwischen 63 €/m² (v00) und 8 €/m² (v05). Unter Berücksichtigung der Schadenskostensätze gemäß der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamts steigen die Umweltfolgekosten deutlich an. Wird ein Schadenskostenansatz von 195 €/t CO_2 angesetzt, so ergeben sich Kosten in Höhe von maximal 493 €/m² (v00) und minimal 64 €/m² (v05). Für die Ausführungsvarianten ergeben sich dabei Kosten in Höhe von 287 €/m² (v01) und 282 €/m² (v02). Zwischen der Massivbauweise und der Holz-Hybridbauweise zeigt sich hierbei kein signifikanter Unterschied. Bei einem Schadenskostenansatz von 680 €/t CO_2 steigen die Umweltkosten deutlich an. Für die Basisvariante ergeben sich Umweltfolgekosten von 1.720 €/m². Verglichen mit den Baukostenobergrenze von 2.250 € pro m² zeigt sich, dass die Umweltfolgekosten fast so hoch sein können wie die Baukosten der Kostengruppen 300 und 400. Für die Ausführungsvarianten ergeben sich Kosten von 999 €/t CO_2 (v01) und 984 €/t CO_2 (v02). Unter Anwendung von Optimierungsverfahren der thermischen Gebäudesimulation und mit der Anrechnung von überschüssiger erneuerbarer Energie können die Umweltkosten auf 610 €/t CO_2 (v03) bzw. 222 €/t CO_2 (v04) reduziert werden.

Für den Basisfall (v01) wird eine Spanne zwischen 37 €/m² und 999 €/m² berechnet. Für die Holz-Hybridbauweise in Kombination mit dem Optimierungsverfahren wird eine Reduktion auf 22 €/m² bis 610 €/m² erreicht.



	v00	v01	v02	v03	v04
25 €/t CO2-Äq.	63 €/m²	37 €/m²	36 €/m²	22 €/m²	8 €/m²
60 €/t CO2-Äq.	152 €/m²	88 €/m²	87 €/m²	54 €/m²	20 €/m²
195 €/t CO2-Äq.	493 €/m²	287 €/m²	282 €/m²	175 €/m²	64 €/m²
680 €/t CO2-Äq.	1.720 €/m²	999 €/m²	984 €/m²	610 €/m²	222 €/m²

Abbildung 11 Umweltfolgekosten für Treibhauspotenzial der untersuchten Gebäudevarianten

V. Zusammenfassung und Ausblick

Im Hinblick auf die Realisierung nachhaltiger und sozialer Wohngebäude ist der Einsatz erneuerbarer Materialien und Energien zielführend. Für den sozialen Wohnungsbau sind zudem die wirtschaftlichen Aspekte von großer Bedeutung. Nach Angaben des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr muss eine Baukostenobergrenze von 2.250 € pro m² Wohnfläche (für die Kostengruppen 300 und 400) eingehalten werden. Berücksichtigt man zusätzlich zu den Baukosten auch die Umweltfolgekosten, so könnte dies ein sehr hohes Risiko für die Realisierung solcher Projekte darstellen. Insbesondere dann, wenn die Kostensätze pro Tonne CO_2-Äq. deutlich ansteigen, wie dies vom Umweltbundesamt diskutiert wird. Die von der Bundesregierung definierten eher konservativen Kostensätze von 25 €/t CO_2-Äq. bzw. 60 €/t CO_2-Äq. ergeben ein geringes Risiko für die Umsetzung von Projekten des geförderten Wohnungsbaus. Abhängig von den verschiedenen Szenarien bezüglich der Kostensätze werden Umweltbelastungskosten von bis zu 1.720 €/m² möglich. Im Vergleich zur Kostenobergrenze von 2.250 € pro m² Wohnfläche können die Umweltfolgekosten ein großes Risiko für den Erfolg der Realisierung von sozialen Wohnprojekten darstellen. Um soziale Wohnungsbauprojekte auch in Zukunft realisieren zu können, müssen diese nachhaltig gebaut werden. Gebäude und die daran gestellten Anforderungen werden immer komplexer werden. Werden stoffliche und energetische Ressourcen von Gebäude in der Zukunft über deren Lebenszyklus erfasst und bewertet und Emissionen hoch bepreist, dann ergeben sich daraus nicht nur große Herausforderungen für die Baubranche, sondern auch zusätzlichen Bewertungs- und Analyseparameter, die an Relevanz gewinnen. Der Einsatz von Lebenszyklusanalysen, Optimierungsalgorithmen und Kompensationsberechnungen anhand des ökologischen Flächenbedarfs wird dabei unumgänglich.

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen auf, dass im Vergleich zum geforderten Mindeststandard, der durch das GEG [3] vorgegeben ist, sind deutliche Verbesserungen über den Lebenszyklus möglich sind. Wenn man darüber hinaus den auf dem Grundstück überschüssig erzeugten erneuerbaren Strom in das Energienetz einspeist und fossilen, nicht erneuerbaren Strom verdrängt, kann eine lebenszyklusbasierte CO_2-positive Nutzungsphase erreicht werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass durch den Einsatz von erneuerbaren Materialien und Energien in der Gebäudeplanung können auch die entsprechenden Umweltkosten erheblich gesenkt werden. Die Umsetzung von geförderten Wohnbauten gemäß dem baurechtlichen Mindeststandard und die daraus resultierenden Umweltfolgekosten können ein Risiko für den Erfolg von Bauprojekten darstellen. Durch die Erweiterung der Betrachtungshorizonte kann die Planung und Umsetzung komplexer (beispielsweise höhere Anzahl an Entwurfsparametern, mehr Abstimmungsprozesse) werden. Hierbei zeigen die Ergebnisse des Forschungsprojekts, dass der Einsatz von Optimierungsverfahren in der thermischen Gebäudesimulation zielführend ist, um die Umweltwirkungen und Umweltkosten von Bauprojekten zu reduzieren. Im Hinblick auf die großen Einflüsse auf Ökosysteme und den damit verbundenen potenziellen Umweltfolgekosten ist ein grundlegender Wandel hin zu nachhaltigen Gebäuden notwendig. Vergleichen mit den Baukostenobergrenzen können, je nach untersuchter Gebäudevariante und angesetzten Schadenskostensätze die Projektkosten um bis zu 76 % mehr betragen.

VI. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Beschreibung der baukonstruktiven Eigenschaften 11

Tabelle 2 Bewertungskriterien mit den jeweiligen Parametern 14

Tabelle 3 Kennwerte der LCA für GWP der drei Grundvarianten 22

Tabelle 4 Optimierte Gebäudeparameter 23

Tabelle 5 Ökologischen Flächenbedarfe der untersuchten Gebäudevarianten 25

VII. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung des Typenhauses 10

Abbildung 2 Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens 15

Abbildung 3 Berücksichtigte Lebenszyklusphasen des Gesamtgebäudes nach DIN EN 15978 für LCA und LCC [11] 16

Abbildung 4 Darstellung der Bewertungsmethode zum ökologischen Flächenbedarf (eigene Darstellung) 19

Abbildung 5 THG der beiden Ausführungsvarianten v01 (Massivbauweise in Kalk-Sand-Stein) und v02 (Holz-Hybrid-Bauweise) 20

Abbildung 6 Vergleich der THG zwischen der Massivbauweise und der Holz-Hybrid Variante 21

Abbildung 7 GWP der Baukonstruktion, Nutzungsphase und TGA über den gesamten Betrachtungszeitraum 21

Abbildung 8 Sensitivitätsanalyse GWP für Variante v01 22

Abbildung 9 Treibhauspotenzial in kg CO_2-Äq. für die optimierte Gebäudevariante v04 getrennt nach Baukonstruktion, Nutzungsphase und Technische Gebäudeausrüstung 24

Abbildung 10 Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen der untersuchten Varianten hinsichtlich des Treibhauspotenzials in kq CO_2-Äq. 24

Abbildung 11 Umweltfolgekosten für Treibhauspotenzial der untersuchten Gebäudevarianten 26

VIII. Literaturverzeichnis

1 United Nations Environment Programme. 2020 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi; 2020.

2 Umweltbundesamt. Wirkungen auf Ökosysteme [Stand: 04.04.2022]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme#einfuhrung.

3 Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG); 2020.

4 Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 276: Building costs.

5 Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. Materialien zum Wohnungsbau: Förderung von Mietwohnraum in Mehrfamilienhäusern; 2021.

6 Wolfgang Sorge Ingenieurbüro für Bauphysik, Hrsg. Nachweis gemäß Enerrgieeinsparverordnung 2016; 2016.

7 Vollmer M, Harter H, Theilig K, Kierdorf D, Lang W. Development of lifecycle based strategies towards buildings with a positive ecological footprint using thermal building simulations. Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA. https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30531; 2021.

8 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hrsg. Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050; 2019.

9 Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN ISO 14040: Environmental management – Environmental management – Life cycle assessment – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework; 2009; 2009.

10 Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN ISO 14044_2018: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines; 2018; 2018.

11 Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 15978: Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method; 2012; 2012.

12 Deutsches Institut für Normung e. V. DINEN15804: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products; 2020; 2020.

13 Riedel T, Stümer W, Hennig P, Dunger K, Bolte A. Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsenke; 2017.

14 Alonso I, Weston K, Gregg R, Morecroft M. Carbon storage by habitat: Review of the evidence of the impacts of management decisions and condition of carbon stores and sources; 2012.

15 Becker N, Emde F, Jessel B, Kärcher A, Schuster B, Seifert C. GRÜNLAND-REPORT Alles im Grünen Bereich?; 2014.

16 Drösler M. Was haben Moore mit dem Klima zu tun; 2009.

17 Gregg R, Elias J, Alonso I, Crosher I, Muto P, Morecroft M. Natural England Research Report NERR094 - Carbon storage and sequestration by habitat: a review of the evidence (second edition); 2021.

18 European Environment Agency. The UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention) [Stand: 25.03.2022]. Verfügbar unter: https://www.eea.europa.eu/themes/air/links/institutions/the-unece-convention-on-long.

19 UNECE Convention on Long-range Transboundary, Hrsg. Introduction, Chapter 1 of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends.; 2015.

20 Martijn Schaap, Carlijn Hendriks, Richard Kranenburg, Jeroen, Kuenen, Arjo Segers, Angela Schlutow, Hans-Dieter Nagel, Anja Ritter, Sabine Banzhaf. PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland.

Impressum

Ansprechpartner bei der Technischen Universität München
und dem Bayerischen Bauindustrieverband:

Technische Universität München
School of Engineering and Design
Department of Architecture
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Autoren

Michael Vollmer, M. Sc.
michael.vollmer@tum.de
Tel.: +49 89 289-25754

Dr.-Ing. Hannes Harter
hannes.harter@tum.de
Tel.:+49 89 289-23969

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
sekretariat.enpb.bgu@tum.de
Tel.:+49 89 289-23990

Industriepartner
wbg Nürnberg GmbH Immobilienunternehmen
Glogauer Str. 70, 90473 Nürnberg
https://wbg.nuernberg.de/

Ferdinand Tausendpfund GmbH
Bukarester Str. 1 c, 93055 Regensburg
https://www.tausendpfund.group/

Abteilung Projektplattform Energie + Innovation
Dipl.-Ing. Sandro Haseloff
s.haseloff@ppe.tum.de
+49 89 289-28153

Abteilung Hochbau und Energie
Dipl.-Ing. (FH)/MBA & Eng. Werner Goller
w.goller@bauindustrie-bayern.de
+49 89 235003-41

Dank
Das Projekt wurde von der Bayerischen Bauwirtschaft gefördert.

Gestaltung
Dipl.-Des. (FH) Daniel Schwaiger

Herausgeber
Bayerischer Bauindustrieverband e.V. (BBIV)
Oberanger 32 | 80331 München
www.bauindustrie-bayern.de

Verlag
Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Arcisstr. 21
80333 München
www.ed.tum.de, kommunikation@ed.tum.de

ISBN 978-3-948278-31-1

© BBIV, 1. Auflage, Juni 2022

Bayerischer Bauindustrieverband e.V.
www.bauindustrie-bayern.de