

Methode zur Ermittlung und Optimierung des ökologischen Flächenbedarfs von Gebäuden basierend auf Lebenszyklusanalysen (LCA) und thermischen Gebäudesimulationen

Michael Vollmer

Vollständiger Abdruck der von TUM School of Engineering and Design der Technischen
Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr. Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
2. Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Ludwig
3. Prof. Dr.-Ing. Stephan Pauleit

Die Dissertation wurde am 10.11.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 27.04.2023 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München (TUM).

Für diese sehr motivierende, inspirierende aber auch herausfordernde Zeit möchte ich mich an erste Stelle bei meinem Erstbetreuer und Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Lang bedanken. Vielen Dank für diese besondere Zeit, welche durch großartige Kolleg:innen, spannende Forschungsprojekte und der Möglichkeit sich selbst zu entfalten geprägt war. Der Zusammenhalt des gesamten Lehrstuhls und das gemeinsame stoische Streben und Entwickeln von Lösungen zum ökologisch positiven Bauen machten diese Zeit zu etwas ganz Besonderem. Ein weiterer großer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Ludwig für die Übernahme des Zweitbetreuers und für die wertvollen und anregenden Gespräche, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Pauleit danke ich für die Übernahme des Drittgutachtens und Herrn Prof. Thomas Auer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitenden des Lehrstuhls für die positive und freudige Zusammenarbeit. Aus den vielen tiefgründigen und auch nicht immer ganz ernstesten Gesprächen sind wichtige Erkenntnisse und bleibende Erinnerungen entstanden, ohne die das Arbeiten nur halb so viel Spaß gemacht hätte. Des Weiteren bedanke ich mich besonders bei meinen Kollegen und Freunden Hannes Harter und Daniel Kierdorf, die mich nicht nur bei der Dissertation unterstützt haben, sondern die auch gemeinsam mit mir den Mut hatten, den Weg in die Selbstständigkeit zu gehen.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Freundin Kathrin Theilig, die mir mit einer beharrlichen Geduld sowohl fachlich und besonders auch mental in den schönen und auch herausfordernden Zeiten dieser Dissertation bei Seite stand. Neben den vielen Gesprächen und Diskussionen half sie mir mit unzähligen Touren in den Bergen, den notwendigen Ausgleich zwischen mir, der Arbeit und der Natur zu finden.

Abschließend geht ein herzliches Dankeschön an meine Familie, die mir es überhaupt ermöglicht haben, diesen Weg einzuschlagen. Sie haben mich stets ermutigt und dabei unterstützt, den eigenen Weg im Leben zu gehen. Ohne diesen Rückhalt wäre diese Dissertation ebenfalls nicht in der Art möglich gewesen.

Kurzfassung

Die aktuelle Situation hinsichtlich des Klimawandels zählt zu einer der größten Herausforderungen der heutigen Gesellschaft. Dabei nimmt insbesondere der Gebäudesektor eine entscheidende Rolle ein. Dieser ist global für rund 35 % des Endenergieverbrauchs und für 38 % der damit verbundenen CO₂-Emissionen verantwortlich [1]. Neben dem Klimaschutz stellt der Umweltschutz eine bedeutende Problemstellung dar. Der Mensch beeinflusst über 80 % der Landflächen [2] und seit Bestehen der Menschheit ist ein Rückgang der Biodiversität um 30 % erkennbar [3]. Dies ist problematisch, da Ökosysteme notwendige Ökosystemdienstleistungen für das Überleben heutiger und zukünftiger Generationen aufweisen. Zur Entwicklung von nachhaltigen Lösungen dient die Lebenszyklusanalyse (LCA) als mögliche Methode zur Quantifizierung von energetischen und stofflichen Ressourcen sowie deren Umweltwirkungen. Die Umweltwirkungen werden im Rahmen von LCAs in Form von Wirkungsindikatoren, wie beispielsweise dem Treibhauspotenzial (GWP), dargestellt. Allerdings fehlen hierbei eine Methode und ein Indikator, mit denen diese Wirkungsindikatoren hinsichtlich ihrer Wirkung auf Ökosysteme eingeordnet und anschaulich dargestellt werden können.

Im Kontext dessen beschäftigt sich diese Dissertation mit der Entwicklung eines geeigneten Indikators. Dabei gliedert sich die vorliegende Arbeit in das Themenfeld des positiven ökologischen Bauens ein, erarbeitet die notwendigen Grundlagen und erweitert den Wissensstand hinsichtlich der Wirkungen von Gebäuden auf Ökosysteme. Die entwickelte Methode erlaubt es, Umweltwirkungen von Gebäuden im Kontext mit den ökologischen Belastungsgrenzen von Ökosystemen zu setzen. Der ökologische Flächenbedarf (en: Ecological Land Demand - ELD) ermöglicht dabei die Erweiterung und die Interpretation bestehender Wirkungsindikatoren zum Treibhaus- (GWP), Versauerungs- (AP) und Euthrophierungspotenzial (EP). Hinsichtlich der ökosystem-spezifischen Kennwerte werden zwei grundlegende biophysikalische Prinzipien angewandt: die Kohlenstoffdioxid-Assimilation und das Konzept der ökologischen Belastungsgrenze (en: Critical Load - CL). Im Hinblick auf die Darstellung von Lebenszyklusanalyse (LCA)-Ergebnissen und in Bezug auf den Umweltschutz bietet diese Methode den Vorteil einer verständlichen Darstellung und einfachen Interpretierbarkeit.

Aus der Anwendung dieser Methode anhand eines existierenden Gebäudes und den durchgeführten parametrischen Analysen und Optimierungen können Umweltentlastungspotenziale durch die Berücksichtigung einer erneuerbaren Energieversorgung und von nachwachsenden Rohstoffen identifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen zudem auf, dass trotz der Anwendung einer erneuerbaren Energieversorgung, der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen und der Anwendung von parametrischer Optimierung nach wie vor Emissionen über den Lebenszyklus anfallen und somit negative Wirkungen auf Ökosysteme bestehen. In Ergänzung zu den technischen Lösungen sind ökologische Maßnahmen zur Kompensation von Umweltwirkungen und zur Wiederherstellung von Ökosystemen notwendig.

Abstract

The current situation regarding climate change is one of the greatest challenges the current society is facing. In this context, the building sector in particular plays a decisive role. Globally, it is responsible for around 35 % of final energy consumption and for 38 % of the associated CO₂ emissions [1]. In addition to climate protection, environmental protection is a crucial challenge. Humans influence over 80 % of the global land area [2] and a 30 % decline in biodiversity has been evident since humanity came into existence [3]. This is problematic because ecosystems provide essential ecosystem services for the survival of present and future generations. To develop sustainable solutions, life cycle analysis (LCA) serves as a possible method to quantify environmental impacts. The environmental impacts are presented within the framework of LCA in the form of impact indicators, such as global warming potential (GWP). However, there is no indicator or method to classify impact indicators on the basis of their effect on ecosystems and to present them in a comprehensible way.

In this context, this dissertation is dedicated to the development of a suitable indicator. In doing so, this dissertation integrates itself into the thematic field of positive ecological building, develops the necessary basics and expands the state of knowledge regarding the effects of buildings on ecosystems. The developed method allows to put environmental impacts of buildings in context with the ecological carrying capacity of ecosystems. The Ecological Land Demand (ELD) thereby allows the extension and interpretation of existing impact indicators to global warming potential (GWP), acidification potential (AP) and eutrophication potential (EP). Regarding the ecosystem-specific parameters, two basic biophysical principles are applied: carbon dioxide assimilation and the concept of Critical Load (CL). Regarding the presentation of LCA results and in terms of environmental protection, this method offers the advantage of an understandable presentation and easy interpretability.

From the application of this method on the basis of an existing building and the parametric analyses and optimizations performed, environmental mitigation potentials can be identified by considering a renewable energy supply and renewable materials. The results of this work also show that despite the application of a renewable energy supply, the use of renewable raw materials and the application of parametric optimization, emissions still occur over the life cycle and thus have negative effects on ecosystems. In addition to technical solutions, ecological measures are necessary to compensate for environmental impacts and to restore ecosystems.

Glossar

Betrachtungszeitraum

„Zeitraum, über den die zeitabhängigen Eigenschaften des Bewertungsgegenstandes analysiert werden.“

[4]

Charakterisierungsfaktor

„Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird.“

[5]

Durchschnittsdaten

„Daten, die repräsentativ für ein Produkt, eine Produktgruppe oder Bauleistungen sind und von einem oder mehreren Hersteller(n) bereitgestellt werden.“ [6]

End-Point Indikator

End-Point Indikatoren stellen Kenngrößen dar, mit denen mehrere Umweltwirkungen wie beispielsweise das Treibhauspotenzial und das Versauerungspotenzial in einem Indikator und in einem konkreten Kontext dargestellt werden können (bspw. den ökologischen Flächenbedarf).

Erneuerbare Energien

„Energie aus erneuerbaren, nichtfossilen Quellen. Beispiele: Windenergie, Sonnenenergie, aerothermische, geothermische, hydrothermische Energie oder Meeresenergie, Wasserkraft, Biomasse, Deponiegas, Klärgas und Biogas.“ [6]

Erneuerbare Ressource

„Ressource, die angebaut oder in menschlichem Zeithorizont auf natürliche Weise erneuert oder gereinigt wird.“ [4]

Funktionelle Einheit

„Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit.“ [5]

Gebäude

„Konstruktion, zu deren Hauptzweck u. a. gehört, als Schutzvorrichtung für Bewohner oder Inhalte zu dienen, gewöhnlich von geschlossener Bauart und entwickelt, um dauerhaft an einem Standort zu verbleiben.“ [4]

Graue Energie und Emissionen

Graue Energien und Emissionen umfassen den Energieverbrauch und die Emissionen, die bei Herstellung, Transport, Verarbeitung und Entsorgung von Bauprodukten und Gebäuden entstehen.

Grüne Infrastruktur

Grüne Infrastruktur stellt ein Netzwerk an natürlicher Elemente dar, die in städtischen und ländlichen Gebieten geschaffen wird, um Umweltqualität und Lebensqualität zu verbessern. Diese umfasst beispielsweise Grünflächen wie Parks, begrünte Fassaden und Dächer. Durch die Integration von grüner Infrastruktur können Städte ökologisch nachhaltiger und widerstandsfähiger gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels werden.

Input

Der Input stellt stoffliche und energetische Ressourcen dar, die in ein System (beispielsweise ein Gebäude) einfließen. Diese Inputs werden während des Produktlebenszyklus identifiziert, quantifiziert und anhand derer Umweltwirkungen bewertet. [5]

Klimaneutral

Ein Produkt oder eine Dienstleistung, das rechnerisch keine CO₂-Emissionen aufweist. [7]

Klimapositiv

Ein Produkt oder eine Dienstleistung, das rechnerisch negative CO₂-Emissionen aufweist. [7]

Komponente

„Bauprodukt, als selbstständige Einheit hergestellt, um einer oder mehreren bestimmten Funktion(en) zu dienen.“ [4]

Lebenszyklus

„Alle aufeinander folgenden und miteinander verbundenen Phasen im Leben des betrachteten Gegenstandes.“ [4]

Lebenszyklusanalyse (LCA)

„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenszyklus.“ [6]

Mid-Point Indikator

Mid-Point Indikatoren stellen Kenngrößen dar, mit denen einzelne Umweltwirkungen wie beispielsweise das Treibhauspotenzial oder das Versauerungspotenzial dargestellt werden können.

Nutzungsdauer

„Nutzungsdauer, die sich für ein Gebäude oder ein zusammengesetztes Bauteil (Bauwerksteil) unter einer Reihe von festgelegten Nutzungsbedingungen erwarten lässt und aus den für die Nutzungsdauer geltenden Referenzdaten unter Berücksichtigung aller Abweichungen von den Referenznutzungsbedingungen ermittelt wurde.“ [4]

Output

„Produkt-, Stoff- oder Energiefluss, der von einem Prozessmodul, wie beispielsweise der Rohstoffgewinnung eines Materials, abgegeben wird.“ [5]

Öko-Effektivität

Die Öko-Effektivität stellt einen Ansatz dar, bei dem Produkte als Nährstoffe in biologische Kreisläufe zurückgeführt werden können oder im technischen Kreislauf kontinuierlich als technische Nährstoffe gehalten werden können. [8]

Öko-Effizienz

Die Öko-Effizienz ist ein Ansatz zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse, durch Lieferung von Waren und Dienstleistungen, wobei die ökologischen Auswirkungen und der Ressourcenverbrauch schrittweise reduziert werden, um die natürlichen biologischen Kapazitäten der Erde nicht zu überschreiten. [9]

ÖKOBAUDAT

„Vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken“ des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB). [10]

Ökologischer Flächenbedarf (ELD)

Der ökologischen Flächenbedarf (in Hektar pro Jahr) stellt die Fläche der bundesweiten natürlichen Ökosysteme dar, die erforderlich ist, um sämtliche Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung, dem Betrieb, dem Austausch von Komponenten und dem Rückbau eines Gebäudes zu binden.

Ökosystem

Ein Ökosystem ist ein dynamisches System aus lebenden Organismen und ihrer physischen Umgebung, das in Wechselwirkung steht. Es umfasst Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen sowie abiotische Faktoren wie Boden, Wasser, Luft und Klima, und beinhaltet komplexe Wechselbeziehungen und ökologische Prozesse.

Restorative Design

Restorative Design beschreibt die Wiederherstellung von sozialen und ökologischen Systemen, die aufgrund von anthropogenen und natürlichen Einflüssen geschädigt wurden. [11]

Regenerative Design

Regenerative Design ist ein prozessorientierter ganzheitlicher Ansatz mit Fokus auf der Wiederherstellung, Erneuerung und Unterstützung von Ökosystemen in ihrer Entwicklung. [12]

Sachbilanz

„Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst.“ [13]

Systemgrenze

„Grenze, die basierend auf einer Reihe von Kriterien festlegt, welche Prozessmodule Teil des untersuchten Systems sind.“ [5]

Umweltwirkung

„Veränderung der Umwelt, unabhängig davon, ob sie sich günstig oder schädlich auswirkt, die ganz oder teilweise von Umweltaspekten herrührt.“ [4]

Wirkungsabschätzung

„Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient.“ [13]

Wirkungsindikator

„Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie.“ [5]

Abkürzungsverzeichnis

AP	Versauerungspotenzial
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BayKompV	Bayerische Kompensationsverordnung
BBIV	Bayerischer Bauindustrieverband e.V.
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BK	Baukonstruktion
BKompV	Bundeskompensationsverordnung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
CF	Charakterisierungsfaktor
CL	Ökologische Belastungsgrenze (en: Critical Load)
CLRTAP	Genfer Luftreinhaltungskonvention (en: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution)
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
ELD	Ökologischer Flächenbedarf (en: Ecological Land Demand)
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EP	Eutrophierungspotenzial
EU	Europäische Union

FFH	Flora-Fauna-Habitat
FW	Fernwärme
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GenOpt	Generic Optimization Program
gha	Globale Hektar
GraScrp	Graphical Scripting
GWP	Treibhauspotenzial
HJ	Hooke-Jeeves
HQE	Haute Qualité Environnementale
LBC	Living Building Challenge
LCA	Lebenszyklusanalyse (en: Life Cycle Assessment)
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
Mrd.	Milliarden
N	Stickstoff
NH₃	Ammoniak
NMVOG	Flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan
NO_x	Stickoxide
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgasemissionen
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (en: Organization for Economic Cooperation and Development)
PM 2,5	Feinstaub mit einem Durchmesser kleiner als 2,5 Mikrometer
ppm	Parts Per Million
PSO	Particle Swarm Optimization
PV	Photovoltaik
RStO	Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
SDGs	Ziele für Nachhaltige Entwicklung (en: Sustainable Development Goals)
SeqR	Kohlenstoffdioxid-Bindungskapazität
SMB	Simple Mass Balance
SO₂	Schwefeldioxid
ST	Solarthermie
UN	Vereinte Nationen (en: United Nations)

UNECE	Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (en: United Nations Economic Commission for Europe)
UW	Umweltwirkungen
vzbv	Verbraucherzentrale Bundesverband
WBCSD	Weltwirtschaftsrat für Nachhaltige Entwicklung (en: World Business Council for Sustainable Development)
WHO	Weltgesundheitsorganisation (en: World Health Organization)
WP	Wärmepumpe
WSV	Wärmeschutzverordnung

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Glossar	vii
Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Hintergrund	3
2.1 Folgen des Klimawandels	3
2.2 Klima- und Umweltschutzziele	6
2.2.1 Klimaschutzziele	6
2.2.2 Umweltschutzziele	7
2.3 Kurzzusammenfassung	9
3 Zielsetzung	11
3.1 Ziele der Arbeit	11
3.2 Aufbau der Arbeit	12
3.3 Forschungsfragen und Forschungshypothesen	14
4 Grundlagen ökologisch positiver Gebäude	15
4.1 Chronologischer Überblick	15
4.2 Überblick und Vergleich verschiedener Konzepte	18
4.3 Paradigmenwechsel im Gebäudesektor	25
4.4 Prinzipien ökologisch positiver Gebäude	28
4.4.1 Energie	29
4.4.2 Materialien	30
4.4.3 Wasser	30
4.4.4 Gesundheit	31
4.4.5 Emissionen	31
4.4.6 Umgebung	31
4.4.7 Biodiversität	32
4.5 Kritische Auseinandersetzung mit bestehenden Ansätzen	32
4.6 Kurzzusammenfassung	33

5	Stand der Technik und Forschung	35
5.1	Positives Bauen in der Gebäudeplanung	35
5.1.1	Baugesetzbuch (BauGB)	35
5.1.2	Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)	36
5.1.3	Bayerische Kompensationsverordnung (BayKompV)	36
5.1.4	Bundeskompensationsverordnung (BKompV)	42
5.1.5	Gebäudeenergiegesetz (GEG)	43
5.1.6	Zertifizierungen	43
5.2	Forschungsarbeiten im Themenfeld	45
5.3	Kurzzusammenfassung	49
6	Beschreibung des methodischen Vorgehens	51
6.1	Übersicht	52
6.2	Lebenszyklusanalyse (LCA)	54
6.2.1	Grundlagen	54
6.2.2	Ermittlung der Umweltwirkungen	60
6.3	Ökosystem-spezifische Kennwerte	63
6.3.1	Grundlagen	63
6.3.2	Ermittlung von Kennwerten	65
6.4	Kombination der Berechnungsmethoden	74
6.4.1	Annahmen und Vereinfachungen	74
6.4.2	Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD)	76
6.5	Lebenszyklusbasierte parametrische Optimierung	80
6.5.1	Implementierung in ein Gebäudesimulationsprogramm	80
6.5.2	Parametrische Optimierung	85
6.6	Kurzzusammenfassung	90
7	Anwendung anhand eines Fallbeispiels	93
7.1	Beschreibung des Fallbeispiels	93
7.2	Grundlagen und Randbedingungen	95
7.2.1	Randbedingungen der Lebenszyklusanalyse	95
7.2.2	Interne Lasten	95
7.2.3	Setpoints für die Steuerung und Regelung	96
7.2.4	Klimadaten	97
7.3	Grundlagen der Vergleichsvarianten	98
7.3.1	Beschreibung der Baukonstruktion und Technische Gebäudeausrüstung	98
7.3.2	Lebenszyklusanalysen	99
7.3.3	Ermittlung der ökologischen Flächenbedarfe	104
7.4	Parametrische Analyse	107
7.4.1	Unabhängige Variablen	108
7.4.2	Abhängige Variable	109
7.4.3	Sensitivität der definierten Parameter	110
7.4.4	Festlegungen und Definitionen für die parametrischen Optimierungen	116

7.5	Parametrische Optimierung	118
7.5.1	Grundlagen zur parametrischen Optimierung	118
7.5.2	Parametrische Optimierung	120
7.5.3	Vergleich des ökologischen Flächenbedarfs	121
7.5.4	Vergleich des spezifischen ökologischen Flächenbedarfs	121
7.5.5	Ergebnisse Fernwärme	123
7.5.6	Ergebnisse Luft-Wasser-Wärmepumpe	129
7.5.7	Vergleich des Endenergiebedarfs mit dem ökologischen Flächenbedarf	136
7.6	Erweiterung des Betrachtungshorizonts	138
7.6.1	Grundstücksebene und Grüne Infrastruktur	138
7.6.2	Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe	143
7.6.3	Plusenergie und Klimaneutralität	145
7.6.4	Bezug auf den bundesweiten Gebäudesektor	147
7.7	Bedeutung der Ergebnisse für die Umsetzung nachhaltiger Gebäude	150
7.8	Kurzzusammenfassung	152
8	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	155
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Fazit	158
8.3	Ausblick	162
	Abbildungsverzeichnis	165
	Tabellenverzeichnis	171
	Literaturverzeichnis	175
A	Anhang - Tabellen	191
B	Anhang - Ökobilanzdaten	197

1 Einleitung

Funktionierende Ökosysteme stellen eine wesentliche Grundlage für das Überleben heutiger und zukünftiger Generationen dar, wobei diese durch eine große Artenvielfalt an Tieren und Pflanzen, funktionierenden Nährstoff- und Wasserkreisläufen sowie dem synergetischen Zusammenspiel aller Lebewesen gekennzeichnet sind. Im Hinblick auf Ökosysteme stellt das anthropozentrische Weltbild jedoch ein bedeutendes Problem dar. Dieses ist dadurch gekennzeichnet, dass Tieren, Pflanzen und unbelebter Materie keine Werte beigemessen werden und diese als eine *Sache* angesehen werden. Mit der Definition, die Natur sei eine *Sache* rechtfertigt die Menschheit die Veränderung und die Ausbeutung der Natur. Damit geht die Ansicht einher, dass die Natur zur bloßen Umwelt des Menschen wird. [14]

In welcher Form die Natur durch den Menschen beeinflusst wird, zeigt sich daran, dass diese als Grundlage für die Nahrungsmittelproduktion, den Rohstoffabbau und zur Aufnahme von Schadstoffen dient [15]. Der menschliche Einfluss umfasst mittlerweile über 80 % der terrestrischen Biosphäre (ohne Grönland und Antarktis) [2]. Seit Bestehen der Menschheit ist zudem ein Rückgang der Biodiversität um etwa 30 % erkennbar [3]. Mit dieser Art des Lebens und des Wirtschaftens, um den gegenwärtigen Konsum und die Bedürfnisse zu befriedigen, zerstört der Mensch die Lebensgrundlage heutiger und zukünftiger Generationen.

In Bezug auf die Gefährdung der Biodiversität und der Stabilität von Ökosystemen stellen Einträge von Luftschadstoffen eine der wesentlichen Risiken dar. Durch übermäßige Stoffeinträge kann das Pflanzenwachstum und deren Verbreitung gravierend beeinflusst werden. Das Problem stellt dabei die zeitliche Komponente zwischen dem Stoffeintrag und der eintretenden Veränderung dar, da Wirkungen erst Jahre später eintreten. [16, 17]

Neben Luftschadstoffen stellt der Klimawandel einer der weiteren Risiken für Ökosysteme dar. Die Ignoranz hinsichtlich dieser Thematik und die mangelnde Umsetzung von notwendigen Maßnahmen zur Vermeidung von negativen Umweltwirkungen in den vergangenen Jahrzehnten führt global zu ansteigenden Durchschnittstemperaturen, Umweltschäden, sozialen Konflikten und häufigeren Extremwetterereignissen wie beispielsweise Hitze- und Dürreperioden, Starkregen, Stürme, Tornados und Hurrikans [18].

Einen wesentlichen Anteil daran hat der Bausektor. Dieser ist global für etwa 35 % des gesamten Endenergiebedarfs und für etwa 38 % der energiebedingten CO₂-Emissionen verantwortlich [1, 19]. Zur Reduktion der Treibhausgase und zur Vermeidung von Umweltschäden wurden auf internationaler, europäischer und bundesweiter Ebene Gesetze und Ziele hinsichtlich des Klima- und Umweltschutzes definiert, wie beispielsweise das Europäische Klimaschutzgesetz [20] und der Europäische Green Deal [21]. Die Deutsche Bundesregierung hat sich im Zuge dessen der Herausforderung gestellt und schärfere Anforderungen festgelegt, mit dem Ziel, die Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen. Dabei gelten auf bundesweiter Ebene das Klimaschutzgesetz [22], der Klimaschutzplan 2050 [23] und das Klimaschutzprogramm 2030 [24]. In Ergänzung zum Klimaschutz gilt im Hinblick auf Luftschadstoffe bundesweit das Luftreinhalteprogramm [25].

Um diese Anforderungen einzuhalten, gilt auf Gebäudeebene das Gebäudeenergiegesetz (GEG), welches Anforderungen an die bauphysikalische Qualität der thermischen Gebäudehülle und an den Primärenergiebedarf stellt. Im Hinblick auf die definierten Ziele zur Klimaneutralität und den Anforderungen des GEG umfasst der Bilanzierungsrahmen nur die Nutzungsphase des Gebäudes. Den formulierten Zielen und der Umsetzung zur Erreichung dieser Ziele auf baurechtlicher Ebene liegen jedoch zwei wesentliche Probleme zugrunde. Zum einen vernachlässigt der baurechtliche Betrachtungshorizont die Herstellungsphase, die Errichtungsphase, den Austausch von Komponenten und den Rückbau des Gebäudes. Dabei wird ein großer Teil der Umweltwirkungen nicht bilanziert, was dazu führt, dass keine geeigneten Maßnahmen zur Reduktion dieser Umweltwirkungen umgesetzt werden. Zum anderen basieren die Strategien auf dem Öko-Effizienz-Ansatz. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass negative Umweltwirkungen in Kauf genommen werden, um die menschlichen Bedürfnisse zu befriedigen. Des Weiteren werden negative Umweltwirkungen nur reduziert. Angesichts der aktuellen Situation hinsichtlich des Klimawandels und der Umweltverschmutzung (wie beispielsweise häufigere Hitzeperioden, reduzierte Verfügbarkeit von Süßwasser und eine erhöhte Gefährdung der menschlichen Gesundheit) besteht die Dringlichkeit darin, nicht nur negative Umweltwirkungen zu reduzieren, sondern das grundlegende und visionäre Ziel des positiven Bauens auf Gebäude-, Quartier- und Stadtebene umzusetzen [26].

Positives Bauen ist durch das holistische Weltbild geprägt, in dem die ganze Natur Rechte besitzt [27, 28]. Im Gegensatz zum anthropozentrischen Weltbild sieht sich der Mensch hierbei nicht mehr im Mittelpunkt der Natur, sondern vielmehr als ein Teil von ihr. Dabei wird das synergetische Zusammenspiel anerkannt und als schützenswert deklariert. Bestehende Konzepte zum positiven Bauen, wie beispielsweise *Regenerative Design*, *Restorative Design* und *Cradle to Cradle*, sind dadurch gekennzeichnet, dass Lösungen und Umsetzungsstrategien die Wiederherstellung von sozialen und ökologischen Systemen erfordert, die durch anthropogene und natürliche Einflüsse geschädigt wurden. Dadurch brechen die Konzepte zum positiven Bauen die bisherigen Denk- und Planungsprozesse auf und erfordern eine mehrdimensionale Betrachtung. Allerdings weisen die Konzepte in ihrer aktuellen Form noch einen theoretischen Charakter auf und sind noch wenig in der Baupraxis erprobt. Weiterer Entwicklungs- und Forschungsbedarf steckt in der Quantifizierung und Bewertung von Umwelteinflüssen auf Gebäudeebene. Zur Quantifizierung von Umweltwirkungen stellt im Gebäudesektor die Lebenszyklusanalyse (LCA) eine anerkannte und erprobte Methode dar. Im Hinblick auf den Umweltschutz und zur Einordnung der Wirkung von Gebäuden auf Ökosysteme fehlt ein geeigneter Indikator.

Ziel dieser Dissertation ist es, auf der Basis von LCA einen geeigneten Indikator zu entwickeln. Die Arbeit gliedert sich dabei in das Themenfeld des positiven ökologischen Bauens ein, erarbeitet die Grundlagen und erweitert den Wissensstand hinsichtlich der Wirkung von Gebäuden auf Ökosysteme. Die entwickelte Methode (der ökologische Flächenbedarf (en: Ecological Land Demand ELD)) soll dabei helfen, den Betrachtungshorizont von Lebenszyklusanalysen und deren Ergebnisse zu erweitern und eine einfachere Interpretierbarkeit zu gewährleisten. Hinsichtlich der Optimierung des ökologischen Flächenbedarfs wird die entwickelte Methode in eine geeignete Simulationssoftware implementiert und mittels Optimierungsverfahren der thermischen Gebäudesimulation optimiert. Als Fallbeispiel dient hierzu ein existierendes Gebäude. Es wird aufgezeigt, welche konkreten Umsetzungsstrategien existieren, um die Wirkung von Gebäuden auf Ökosysteme zu optimieren.

2 Hintergrund

In diesem Kapitel wird auf den aktuellen Stand des Klima- und Umweltschutzes eingegangen. Ein besonderer Fokus liegt darin, die weitreichenden Folgen des Klimawandels in sozio-ökologischer Betrachtung aufzuzeigen und den notwendigen Wandel zu begründen (siehe Kapitel 2.1). Darauf aufbauend sind im Kapitel 2.2 die Klima- und Umweltschutzziele auf bundesweiter, europäischer und internationaler Ebene für den Gebäudesektor erläutert.

2.1 Folgen des Klimawandels

Die Klimakrise stellt, nach Angaben der Europäischen Union EU, die größte zu lösende Herausforderung für die aktuelle Generation dar [29]. In Bezug auf diese Herausforderung stellt Precht im Rahmen des Freiburger Mittelstandkongresses 2019 allerdings fest: „Wir leben in einer Welt, in der wir nicht glauben, was wir wissen“ [30]. Besonders in Bezug auf den bevorstehenden gesellschaftlichen Wandel (Industrielle Revolution 5.0 und Klimawandel) stellt er ein fehlendes Bewusstsein der heutigen Generation fest. Der fehlende Wille, Maßnahmen zum Klima- und Umweltschutz umzusetzen, ist im Hinblick auf den Verlust an Biodiversität und den damit einhergehenden Rückgang von Ökosystemdienstleistungen erkennbar und problematisch. Nach Sanderson et al. beeinflusst der Mensch über 80 % der globalen terrestrischen Biosphäre (ohne Grönland und Antarktis) [2]. Des Weiteren ist seit Bestehen der Menschheit ein Rückgang der Biodiversität um ca. 30 % zu erkennen. Dies ist bedenklich, da Ökosysteme lebenswichtige Dienstleistungen für Menschen erbringen. [3]

Laut dem Umweltbundesamt sind Luftschadstoffe neben dem Klimawandel das Hauptrisiko für terrestrische Ökosysteme [19]. Irreversible Schäden an Ökosystemen bergen das Risiko einer erheblichen Destabilisierung von zentralen Klima-Kippelementen, wie beispielsweise der Verlust an Regenwald und gestörten Wasserkreisläufen. Dies führt unter anderem dazu, dass ein rascher Anstieg an Megabränden insbesondere in den USA, Russland und Australien zu verzeichnen ist [31]. Um diese irreversiblen Schäden zu vermeiden, müssen laut den Vereinten Nationen (en: United Nations) (UN) bis zum Jahr 2030 Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden [32].

In dieser Betrachtung ist es wichtig, die Entwicklung der Weltbevölkerung mit einzubeziehen. Gemäß der UN ist mit einem Bevölkerungswachstum von 8,0 Milliarden (Mrd.) im Jahr 2022 auf 9,7 Mrd. bis 2050 zu rechnen. Prognosen für das Jahr 2100 gehen von einem Höchststand von 11 Mrd. aus [33]. Gravierend bewertet António Guterres, Generalsekretär der UN, die aktuelle Lage des Planeten: „um es einfach auszudrücken: Der Zustand des Planeten ist kaputt“ [34]. In einem Bericht der UN, in dem der gefährliche Rückgang der Natur thematisiert und analysiert wird, ergeben sich zusammenfassend folgende Fakten [35]:

- Verschlechterung der Zustände von Ökosystemen, im Vergleich zu ihrem geschätzten natürlichen Ausgangszustand um etwa 47 %

- Jährlich werden weltweit ca. 60 Mrd. Tonnen erneuerbare und nicht erneuerbare Ressourcen aus der Erde entnommen; dies entspricht einem Anstieg um fast 100 % seit 1980
- Seit den 1980er-Jahren ist ein Anstieg des weltweiten Pro-Kopf-Verbrauchs an Konsumgütern um insgesamt +15 % festzustellen
- Über 85 % der im Jahr 1700 noch vorhandenen Feuchtgebiete wurden bis zum Jahr 2000 zerstört

Kritisch wirken sich diese Aspekte auf die globale sozio-ökologische Situation aus. Es zeigt sich, dass der Klimawandel nicht direkt zu gewalttätigen Konflikten führt, die Konflikte aber indirekt dadurch beeinflusst werden. Hierunter zählen unter anderem soziale und wirtschaftliche Faktoren und die daraus entstehenden Ungleichheiten. Das Internationale Komitee des Roten Kreuzes stellt fest, dass weltweit in 25 der betroffenen Nationen im Hinblick auf den Klimawandel bereits in 14 gewalttätige Konflikte bestehen [36]. Gleichermaßen stellt die internationale Friedensorganisation *International Alert* fest, dass der Klimawandel am stärksten Menschen im Globalen Süden trifft und weiterhin treffen wird. Sie weisen darauf hin, dass sekundäre Aspekte des Klimawandels zu betrachten sind, die letztlich zu sozioökonomischen und politischen Problemen in diesen Staaten führen. Auf globaler Ebene gibt *International Alert* an, dass es in 46 Ländern, in denen 2,7 Mrd. Menschen leben (dies entspricht etwa 34 % der aktuellen Weltbevölkerung), zu potenziellen gewaltsamen Konflikten kommen kann. Sie fordern daher, dass auf globaler politischer Ebene der Klimawandel und die notwendigen Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen eine höhere Priorität beigemessen wird. Prognosen gehen davon aus, dass die Anzahl an Menschen, die infolge von Klimaänderungen aus ihrem Lebensraum vertrieben werden, steigen wird [37]. Wichtig ist dabei, dass die Maßnahmen in Interaktion mit den betroffenen Bevölkerungen und in Abstimmung mit den lokalen Gegebenheiten stattfinden [38]. Dass Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen sozial gerecht sein müssen, zeigen Martin et al. in einer ausführlichen Studie, bei der Forschende aus 57 verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen zusammengearbeitet haben [31]. Sie konstatieren, dass es ein Ausgleich zwischen den Reichsten und den Ärmsten geben muss, da insgesamt 52 % der globalen Emissionen von den 10 % der Reichsten verursacht werden. In der Studie gehen die Forschenden auf die Kosten des Klimaschutzes ein. Dabei zeigen sie auf, dass Maßnahmen zum Klimaschutz einen höheren wirtschaftlichen Wert als die Kosten der Minderungsmaßnahmen aufweisen. Dies lässt sich damit begründen, dass Klimaschutzmaßnahmen unmittelbare positive Wirkungen für die Gesundheit, für Mensch und Natur mit sich bringen. Der Wert des gesundheitlichen Zusatznutzens kann daher eine rasche Ausweitung von Minderungsmaßnahmen und -technologien rechtfertigen und den Fortschritt hin zu einer emissionsfreien Wirtschaft beschleunigen. Zur Sicherstellung einer lebenswerten Umwelt, für heutige und zukünftige Generationen, ist ein grundlegendes Umdenken und rasches Handeln erforderlich.

Im heutigen Streben nach einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Zukunft spielt der Bausektor eine wichtige Rolle. Weltweit ist der Gebäudesektor für ca. 35 % des gesamten Endenergiebedarfs verantwortlich. Darüber hinaus belaufen sich die damit verbundenen CO₂-Emissionen weltweit auf ca. 38 % (siehe Abbildung 2.1 auf Seite 5). [1]

Es zeigt sich dabei auch, dass die Sektoren der sonstigen Industrie und des Transports große Anteile am Endenergiebedarf und den Kohlenstoffdioxid (CO₂) Emissionen aufweisen. Um die globalen Klima- und Umweltprobleme zu lösen, gilt es ganzheitliche und sektorübergreifende Lösungen zu finden.

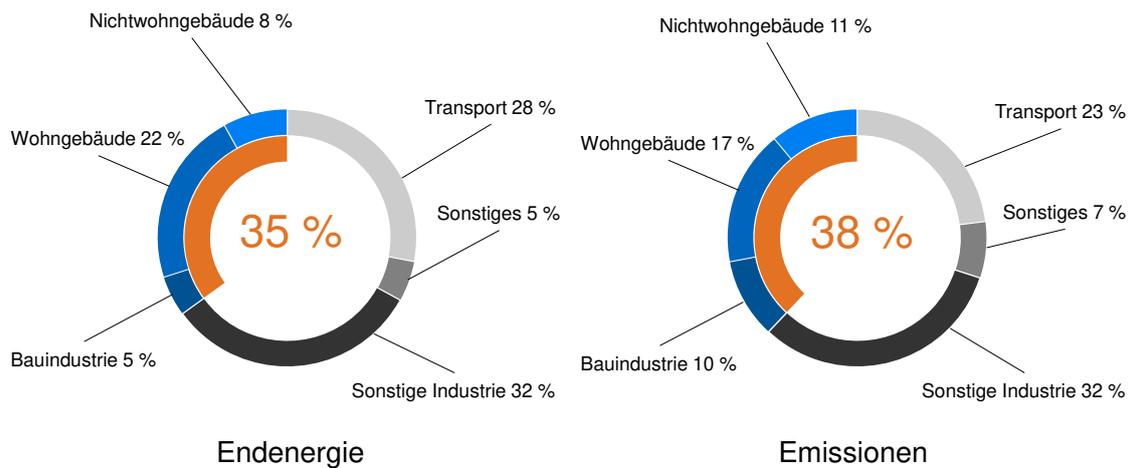


Abbildung 2.1 Weltweiter Anteil an Endenergie und CO₂-Emissionen im Bauwesen, Stand 2019 (Quelle: in Anlehnung an [1]; leicht modifiziert)

Auf der Grundlage des wachsenden wissenschaftlichen und politischen Bewusstseins und im Kontext der nachhaltigen Entwicklung sind eine Vielzahl von Umsetzungsstrategien entwickelt worden. Dies führte zum Beispiel zum europaweiten Konzept, dem Europäischen Grünen Deal. Dessen Ziel es ist, die sektorübergreifende nachhaltige Entwicklung zu fördern und strenge Anforderungen zu stellen [21]. Diese Strategien (wie beispielsweise das Gebäudeenergiegesetz (GEG)) basieren jedoch auf dem Öko-Effizienz-Ansatz, der darauf abzielt, negative Umweltauswirkungen zu verringern, z. B. die CO₂-Emissionen zu reduzieren [39]. Nach Ansicht von McDonough & Braungart kann die Anwendung von Nachhaltigkeitsprinzipien nur zur Erreichung von kurzfristigen Zielen führen. Sie stellen fest, dass bestehende Ansätze zur Nachhaltigkeit fehlerhaft sind, da nur eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der Umweltverschmutzung erreicht werden können. Daher können die Auswirkungen von Gebäuden und Menschen auf die Umwelt letztlich nur weniger schlecht sein. [40]

Die Notwendigkeit, den Standpunkt von einer weniger schlechten zu einer positiven Perspektive zu ändern, wird durch die Ermittlung der Auswirkungen des Menschen auf die Umwelt deutlich. Des Weiteren muss der öko-effiziente Ansatz durch einen öko-effektiven Ansatz ersetzt werden. Durch die Anwendung dieses Ansatzes werden positive Auswirkungen auf die Umwelt erzielt [41]. Es gibt bereits Konzepte, wie beispielsweise das *Cradle to Cradle-Designkonzept* [39] und das *Regenerative Design* [12, 42, 43].

Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben und von Precht festgestellt, besteht ein weiteres Defizit an den Glauben und die Wichtigkeit, die der Klimawandel darstellt. Wieso Menschen, trotz des vorhandenen Wissens nicht so handeln, wie sie sollten, zeigt Roth [44]: Die kognitive Informationsverarbeitung findet in einem Bereich des Gehirns statt, der nicht direkt mit Gefühlen und Absichten zu tun hat und damit zu keinem direkten Handeln führt. Ein Handeln wird nur dann umgesetzt, wenn bewusste und unbewusste Motive sowie tiefgreifende Persönlichkeitseigenschaften angesprochen werden. Im Hinblick auf den Klimawandel gibt Roth folgende Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Verhaltensänderung an:

- Informationsaustausch und der Appell müssen einfach, klar und widerspruchsfrei sein
- Denkweisen und Handlungen müssen im Alltag implementiert werden
- Menschen müssen erkennen, dass der Klimawandel einen persönlichen Bezug hat

- Konkrete Handlungsempfehlungen sind notwendig, wobei zwischen kurz- und langfristigen Zielen unterscheiden werden muss
- Förderung von intrinsischen Belohnungsmechanismen müssen implementiert werden (bspw. im Kindergarten; beginnend mit Belohnungen für umweltgerechtes Handeln).

2.2 Klima- und Umweltschutzziele

2.2.1 Klimaschutzziele

Mit dem Pariser Klimaabkommen von 2015 hat sich die internationale Staatengemeinschaft auf das Ziel geeinigt, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen [45]. Um dieses Ziel zu erreichen, gilt auf europäischer Ebene das Klimaschutzgesetz in der neuesten Novellierung von 2021. Das Klimaschutzgesetz formuliert dabei konkrete Ziele, welche zuvor im europäischen Grünen Deal definiert wurden. Generell regt die Europäische Kommission zu mehr Ehrgeiz in der Klimapolitik an, um eine klimaneutrale Zukunft zu realisieren [29]. Aufbauend auf dem europäischen Klimaschutzgesetz hat die deutsche Bundesregierung ein eigenes Klimaschutzgesetz formuliert. Dabei hat die Bundesregierung grundsätzlich strengere zu erreichende Grenzwerte definiert als die Europäische Union (EU). Die Klimaschutzziele für Deutschland, Europa und im internationalen Kontext sind in der Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Vergleich der Klimaschutzziele für Deutschland, Europa und im internationalen Kontext in Bezug auf die Treibhausgasemissionen (THG) gegenüber dem Basisjahr 1990 (Quelle: in Anlehnung an [46]); leicht modifiziert

	Klimaschutzziele	Strategien
Deutschland	2030: mindestens -65 % 2040: mindestens -88 % 2045: Treibhausgasneutralität	Klimaschutzgesetz [22] Klimaschutzplan 2050 [23] Klimaschutzprogramm 2030 [24]
Europa	2030: mindestens -55 % 2050: Klimaneutralität	Europäisches Klimaschutzgesetz [20] Europäischer Grüner Deal [21] EU-Emissionshandel
International	Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter 2 °C, möglichst 1,5 °C	Pariser Klimaabkommen [45], nationale festgelegte Beiträge (NDCs) Grüner Klimafond

Im europäischen Klimaschutzgesetz ist eine Reduktion der THG um -55 % bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Stand aus 1990 definiert. Die Klimaneutralität wird für das Jahr 2050 angestrebt. Nach dem Jahr 2050 wird eine Verpflichtung zu negativen Emissionen vorgesehen. Um diese grundsätzlichen Anforderungen zu erreichen, erkennt die EU mittlerweile die Notwendigkeit zur Förderung von ökologischen Kohlenstoffsinken an.

Im Klimaschutzgesetz der deutschen Bundesregierung sind schärfere Anforderungen als im europäischen Klimaschutzgesetz definiert. Für das Jahr 2030 ist eine Reduktion um weitere -10 % auf -65 % formuliert. Des Weiteren wird ein Zwischenziel für 2040 definiert, wobei eine Reduktion der Treibhausgase um -88 % gefordert wird. Auch hinsichtlich der Treibhausgasneutralität bis 2045 ist das Ziel der Bundesregierung

ehrgeiziger. Neben den konkreten Anforderungen hinsichtlich der Reduktion der THG betont das Gesetz, wie wichtig Ökosysteme für den Klimaschutz sind. Um unvermeidbare THG zu binden, werden Wälder und die Renaturierung von Mooren als wichtige, natürliche CO₂-Senken angesehen. Um die Transformation zu beschleunigen, hat die Bundesregierung ein Sofortprogramm für mehr Klimaschutz im Kabinett verabschiedet [47]. Im Klimaschutz-Sofortprogramm 2022 sind sektorübergreifende und vor allem kurzfristige Maßnahmen beschrieben, die den Ausstoß an THG verringern sollen. Für den Bausektor werden finanzielle Mittel speziell zur Förderung der energetischen Sanierung und klimafreundlicher Neubauten bereitgestellt. Gemäß dem Klimaschutzplan 2050 werden für den Gebäudesektor folgende Maßnahmen formuliert, welche allerdings gesetzlich noch nicht verpflichtend sind [23]:

- Weiterentwicklung des Niedrigstenergiegebäudestandards (nZEB)
- Anreize zur Nutzung und Errichtung von Gebäuden, die mehr Energie erzeugen als für den Betrieb erforderlich ist
- Steigerung der energetischen Sanierungsrate
- Schrittweise Umstellung auf erneuerbare Energien
- Förderung von nachhaltigen und nachwachsenden Baustoffen
- Gebäude sollen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden

2.2.2 Umweltschutzziele

In Ergänzung zum Klimaschutz stellt der Umweltschutz ein weiteres globales und nationales Schutzziel dar. Eine Studie des Umweltbundesamtes zeigt, dass Luftschadstoffe maßgeblich zu einem Verlust der Biodiversität in terrestrischen Ökosystemen beitragen können [48]. Da sich Luftschadstoffe nicht nur negativ auf Ökosysteme, sondern auch auf Menschen auswirken können, hat die Weltgesundheitsorganisation (en: World Health Organization) (WHO) Luftqualitätsleitlinien veröffentlicht. Global stellen diese Luftqualitätsleitlinien die maßgebliche Richtlinie dar. Im Rahmen derer werden die Auswirkungen von Luftverschmutzung auf die Gesundheit dargestellt und Empfehlungen zur Luftreinhaltung formuliert. Die aktuellsten Luftqualitätsleitlinien wurden im September 2021 veröffentlicht [49]. Darin enthalten sind Empfehlungen hinsichtlich Feinstaub, Schwefeldioxid, Ozon, Stickstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid. Um global Luftschadstoffe zu minimieren, gelten gemäß der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (en: United Nations Economic Commission for Europe) (UNECE) die Genfer Luftreinhaltungskonvention (en: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) (CLRTAP) [50]. Umgesetzt sind die Anforderungen in der EU-Richtlinie (EU) 2016/2284 [51] (siehe Tabelle 2.2 auf Seite 8). Strategien zur Erreichung dieser Ziele sind für Deutschland im nationalen Luftreinhaltprogramm formuliert [25].

Tabelle 2.2 Anforderungen an die Reduktion von Emissionen auf Basis des Göteborg-Protokolls [52] gegenüber dem Basisjahr 2005 (Quelle: in Anlehnung an [53]; leicht modifiziert)

	Einzuhalten ab 2020	Einzuhalten ab 2030
SO ₂	-21 %	-58 %
NO _x	-39 %	-65 %
NMVOG	-13 %	-28 %
NH ₃	-5 %	-29 %
PM 2,5	-26 %	-43 %

In Bezug auf die Umweltwirkungen stellt die Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden eine Bewertungsmethode dar, in der baurechtliche Anforderungen noch gänzlich vernachlässigt werden. Auf baurechtlicher Ebene gilt für die Sanierung und Neubauten das Gebäudeenergiegesetz (GEG) [54]. Im GEG werden das ehemals geltende Energieeinsparungsgesetz (EnEG), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zusammengeführt. Im Rahmen des GEG wird nur die Nutzungsphase des Gebäudes betrachtet. Zudem werden Anforderungen an den Primärenergiebedarf und die Qualität der thermischen Gebäudehülle definiert. Direkte Bezüge zu den definierten Umweltschutzziele fehlen. Die Herstellung, der Austausch und die Entsorgung von Materialien und Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung wird nicht berücksichtigt. Auch im Hinblick auf die bisherigen Novellierungen zeigt sich, dass die Entwicklung von der EnEV hin zum jetzigen GEG nicht ausreichend ist, um damit die definierten Klimaziele zu erreichen. Dies wird unter anderem von der Deutschen Umwelthilfe e. V. [55] und der Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv) [56] kritisiert. Beide sehen im GEG keinen nennenswerten Beitrag zur Erreichung der Klimaziele im Gebäudesektor. Des Weiteren fordern beide, dass höhere Mindeststandards definiert werden und ein Verbot für fossile Energieträger forciert werden muss. Um die Klima- und Umweltschutzziele einhalten zu können, ist eine Weiterentwicklung des GEG notwendig.

2.3 Kurzzusammenfassung

Der Klimawandel stellt gemäß der Europäischen Union die größte zu lösende Herausforderung unserer Gesellschaft dar. Dies zeigt sich darin, dass ein massiver Rückgang der Biodiversität und Ökosystemdienstleistungen erkennbar ist. Zudem trägt der Klimawandel zur sozialen Ungleichheit bei und stellt ein großes Risiko für gewalttätige Konflikte dar. Um dem entgegenzuwirken, sind auf internationaler, europäischer und bundesweiter Ebene Klima- und Umweltschutzziele definiert. Die definierten Ziele beziehen sich auf die Reduktion von Treibhausgasen und ausgewählten Luftschadstoffen. Die Reduktion von negativen Umweltwirkungen wird im wissenschaftlichen Kontext diskutiert. Es wird betont, dass dies nicht genug sei, um die globalen umweltbezogenen Probleme zu lösen. Es wird ein neuer Ansatz und ein Umdenken gefordert, bei dem nicht nur negative Umweltwirkungen reduziert, sondern mit gezielten Maßnahmen positive Wirkungen erreicht werden. Hierzu bestehen bereits Ansätze, wie beispielsweise die Konzepte des *Regenerative Design* und *Cradle to Cradle*.

In Bezug auf die Ausgangslage lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

- Der Klimawandel stellt die größte zu lösende Herausforderung der aktuellen Gesellschaft dar [29]
- Der Rückgang der Biodiversität beträgt 30 % seit Bestehen der Menschheit [3]
- Irreversible Schäden an Ökosystemen können zu erheblichen Destabilisierungen führen
- Prognosen gehen von 9,7 Milliarden (Mrd.) Menschen im Jahr 2050 und 11 Mrd. Menschen im Jahr 2100 aus [33]
- Gebäude sind weltweit für ca. 35 % des Endenergieverbrauchs und rund 38 % der CO₂-Emissionen verantwortlich [1]
- Baurechtlich werden die lebenszyklusbezogenen Wirkungen von Gebäuden auf Ökosystem vernachlässigt
- Die bisherige Öko-Effizienz-Strategie wird diskutiert und ein ökoeffektiver Ansatz (positives Bauen) gefordert [40]
- Konzepte zum positiven Bauen bestehen bereits, sind aber stellenweise noch sehr theoretisch und nicht praktisch erprobt

3 Zielsetzung

3.1 Ziele der Arbeit

In Bezug auf die Klima- und Umweltschutzziele wird der bisherige Ansatz der Öko-Effizienz zunehmend infrage gestellt und gleichzeitig wird die Anwendung von Ansätzen zum positiven Bauen (Öko-Effektivität) diskutiert. Ansätze zum positiven Bauen, wie z. B. *Cradle to Cradle* oder *Regenerative Design* wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt und haben zum Ziel, negative Umweltwirkungen nicht nur zu reduzieren, sondern positive Wirkungen auf Mensch und Natur zu forcieren. Diese Ansätze sind in der aktuellen Form stellenweise noch theoretisch und im Bausektor wenig praktisch erprobt. In Hinblick auf positive ökologische Gebäude und die Quantifizierung der Wirkung von Gebäuden auf Ökosysteme untergliedern sich die Ziele dieser Arbeit in die folgenden drei Themenfelder.

Grundlagen

Im ersten Themenfeld beschäftigt sich diese Arbeit grundlegend mit Ansätzen zum positiven ökologischen Bauen. Ziel ist im ersten Schritt aufzuarbeiten, welche Ansätze zu positiven ökologischen Gebäuden bereits bestehen, wie sich diese definieren und welche Handlungsfelder sowie Umsetzungsstrategien sich dabei identifizieren lassen.

Positives Bauen in der Gebäudeplanung

Basierend auf dieser Grundlage wird im nächsten Schritt identifiziert, inwiefern Aspekte des positiven Bauens bereits in der Gebäudeplanung integriert und berücksichtigt werden. Es wird dabei auf die Bauleitplanung, die baurechtliche Gebäudeplanung und auf Gebäudezertifizierungen eingegangen.

Wirkung auf Ökosysteme

Hinsichtlich der Wirkung auf Ökosysteme ist das Ziel eine Methodik zu entwickeln, mit der, basierend auf ausgewählten Wirkungsindikatoren von Lebenszyklusanalysen, der ökologische Flächenbedarf quantifiziert werden kann. Aufbauend auf dem ökologischen Flächenbedarf werden mithilfe von parametrischen Optimierungen die Potenziale zur Erreichung von positiven ökologischen Gebäuden aufgezeigt und Erkenntnisse für die Gebäudeplanung abgeleitet.

3.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Dissertation ist in Abbildung 3.1 auf Seite 13 dargestellt.

In das Themenfeld der Arbeit werden in **Kapitel 1** und **Kapitel 2** eingeleitet. Hier werden die Problemstellung, die Motivation und die Klima- und Umweltschutzziele im Gebäudesektor dargestellt.

In **Kapitel 3** wird die Zielsetzung und der Aufbau der Arbeit beschrieben. Des Weiteren sind in diesem Kapitel die Forschungsfragen und Forschungshypothesen formuliert.

Darauf aufbauend wird in **Kapitel 4** auf die Grundlagen von ökologisch positiven Gebäuden eingegangen. Dabei wird ein Überblick über die historische Entwicklung des nachhaltigen Bauens und die daraus entstandenen verschiedenen Konzepte zum positiven Bauen gegeben. Des Weiteren wird in diesem Kapitel der notwendige Paradigmenwechsel im Gebäudesektor thematisiert und aufgezeigt, welche Merkmale ökologisch positive Gebäude aufweisen.

Anschließend wird in **Kapitel 5** der aktuelle Stand der Technik und Forschung aufgezeigt und diskutiert. Im Stand der Technik wird darauf eingegangen, inwiefern Prinzipien und Ansätze zu positiven ökologischen Gebäuden bereits in der aktuellen Gebäudeplanung verankert sind. Im Abschnitt zum Stand der Forschung wird insbesondere auf die Quantifizierung von Wirkungen von Gebäuden auf Ökosysteme basierend auf Lebenszyklusanalyse (LCA) eingegangen.

Aufbauend auf dem Stand der Technik und Forschung wird mit den gewonnenen Kenntnissen in **Kapitel 6** die entwickelte Methode zur Quantifizierung und Optimierung des ökologischen Flächenbedarfs von Gebäuden auf Basis von Lebenszyklusanalysen und thermischen Gebäudesimulationen beschrieben.

In **Kapitel 7** wird die entwickelte Methode auf ein Fallbeispiel angewendet. Der ökologische Flächenbedarf wird im ersten Schritt anhand von zwei definierten Gebäudestandards berechnet. Zum einen gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) und zum anderen in der umgesetzten Ausführungsvariante des ausgewählten Gebäudes. Darauf aufbauend wird mit einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss von definierten Gebäudeparametern und der Einfluss auf den ökologischen Flächenbedarf dargestellt. Im letzten Schritt wird mittels thermischer Gebäudesimulation und der Verwendung von Optimierungsalgorithmen eine parametrische Optimierung des Gebäudes durchgeführt. Dabei wird aufgezeigt, inwiefern der ökologische Flächenbedarf über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes positiv beeinflusst werden kann und welche Potenziale dabei die Umsetzung von Grüner Infrastruktur aufweist.

Die Ergebnisse werden anschließend in **Kapitel 8** zusammengefasst und die erarbeiteten Erkenntnisse in den Gesamtkontext des Gebäudesektors eingeordnet und es wird weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

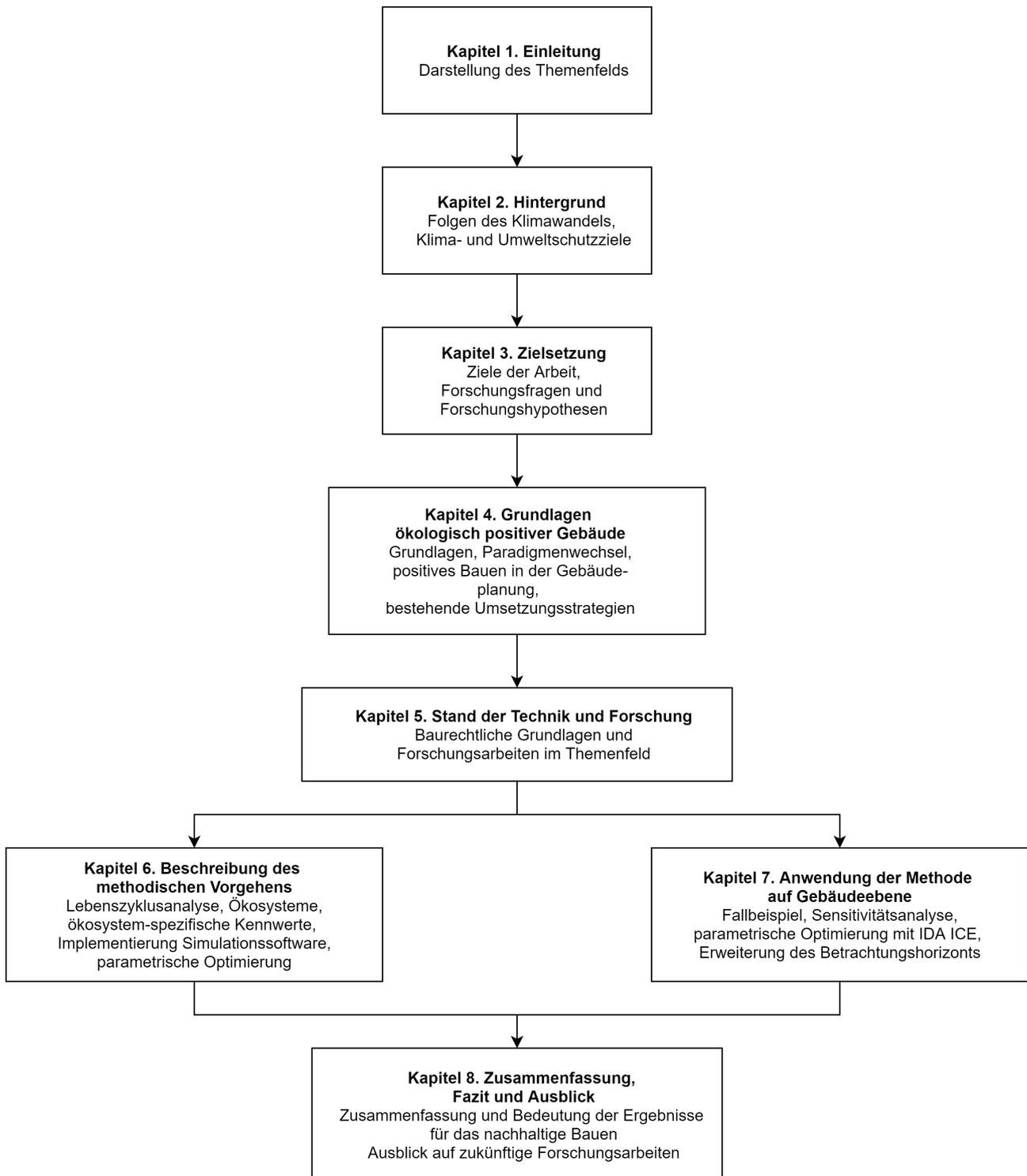


Abbildung 3.1 Ablaufdiagramm der Forschungsarbeit (eigene Abbildung)

3.3 Forschungsfragen und Forschungshypothesen

Basierend auf dem Hintergrund und der Zielsetzung der Arbeit ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie definiert sich positives ökologisches Bauen und welche Handlungsfelder lassen sich hierfür identifizieren?
- Inwiefern sind Aspekte des positiven Bauens bereits in der Gebäudeplanung baurechtlich implementiert?
- Ist es möglich, basierend auf Lebenszyklusanalysen (LCA) den ökologischen Flächenbedarf in Bezug auf Ökosysteme von Gebäuden zu ermitteln?
- Welche Potenziale bieten lebenszyklusbasierte parametrische Optimierungen von Gebäuden in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf?

Unter Berücksichtigung der vorigen Kapitel und den formulierten Forschungsfragen lassen sich folgende Forschungshypothesen ableiten. Im Rahmen dieser Arbeit gilt es, diese auf ihre Gültigkeit hin zu prüfen.

1. Konzepte des positiven Bauens werden in der Gebäudeplanung hinreichend baurechtlich gefordert.
2. Lebenszyklusanalysen (LCA) bieten eine ausreichende Grundlage zur Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs.
3. Durch Sensitivitätsanalysen und lebenszyklusbasierte parametrische Optimierungen können Umsetzungsstrategien für Gebäude mit einem positiven ökologischen Flächenbedarf abgeleitet werden.

4 Grundlagen ökologisch positiver Gebäude

Wie in Kapitel 2 beschrieben, zeigen verschiedene Untersuchungen, welchen großen Stellenwert der Gebäudesektor hinsichtlich Klima- und Umweltschutz einnimmt und welcher notwendige Handlungsdrang daraus entsteht. Um die Klima- und Umweltschutzziele zu erreichen, bedarf es neuer Lösungen und ein grundlegendes Umdenken im Bausektor. Ökologische Lösungen werden dabei maßgeblich an Bedeutung gewinnen und essenziell sein, um Umweltschäden ökologisch zu kompensieren. Nachfolgend werden die Grundlagen ökologisch positiver Gebäude dargestellt. Hierzu wird in Kapitel 4.1 ein chronologischer Überblick über die Entwicklung positiver Gebäude gegeben. Anschließend werden in Kapitel 4.2 die verschiedenen Ansätze zum positiven Bauen erläutert und deren Merkmale verglichen. Der notwendige Paradigmenwechsel hinsichtlich der Betrachtung, der Bewertung und der Planung von zukünftigen Gebäuden wird in Kapitel 4.3 erläutert. Welche Prinzipien und Umsetzungsstrategien positive Gebäude aufweisen, wird in Kapitel 4.4 beschrieben. Abschließend werden in Kapitel 4.5 die bestehenden Ansätze zum positiven Bauen kritisch analysiert.

4.1 Chronologischer Überblick

Die aufgezeigte chronologische Darstellung basiert auf der Studie von Mang und Reed [42]. Da seit der Veröffentlichung dieser Studie (2017) noch weitere bedeutende Entwicklungen stattfanden, wird die chronologische Darstellung punktuell ergänzt. Dargestellt ist der chronologische Überblick in Tabelle 4.1 auf Seite 16. Aufgezeigt werden das Jahr, die Autor:in, der Titel der Veröffentlichung und eine kurze Beschreibung, welche Bedeutung dieser Beitrag im Hinblick auf das positive Bauen einnimmt.

Tabelle 4.1 Chronologischer Überblick über relevante Meilensteine hinsichtlich *Regenerative Design* und *positives Bauen*, sowie punktuell ergänzt durch weitere Quellen (Quelle: in Anlehnung an [42]; leicht modifiziert)

Jahr	Autor:in, Titel und Konzept
1880	E. Howard, <i>To-morrow: A Peaceful Path to Social Reform</i> , Beschreibung einer Stadt, in der Menschen in Harmonie mit der Natur leben
1935	A. Tansley, definiert den Begriff <i>Ökosystem</i>
1953	E. und H. Odum, <i>The fundamentals of ecology</i> , liefert die Grundlage zum Verständnis, wie ökologische Systeme interagieren
1968	L. von Bertalanffy, <i>General System Theory: Foundations, Development, Applications</i> , betont den Unterschied zwischen physikalischen und biologischen Systemen
1969	I. McHarg, <i>Design with Nature</i> , grundlegendes Lehrbuch für die ökologische Sichtweise der urbanen Landschaftsgestaltung, Grundkonzepte wurden später zum Geographischen Informationssystemen (GIS) weiterentwickelt
1960-1970	C. Krone, entwickelt den Ansatz <i>Living System Thinking</i>
1978	B. Mollison und D. Holmgren, Definition des Begriffs <i>Permakultur</i>
1980-90	R. Rodale, verwendet den Begriff <i>Regenerative</i> in Bezug auf Landnutzung und fordert die Nachhaltigkeit weiterzudenken
1984	J. T. Lyle, <i>Design of Human Ecosystems</i> , liefert entscheidende Grundlagen für den Ansatz <i>Regenerative Design</i>
1992	D. Orr, <i>Ecological literacy: education and the transition to a post-modern world</i>
1994	J. T. Lyle, <i>Regenerative Design for Sustainable Development</i>
1996	S. van der Ryn und Stuart Cowan, <i>Ecological Design</i>
1997	P. Mang und B. Reed, Gründung der Regenesys Group
1999	McLennan und Berkebile, Publikation <i>The Living Building</i>
2006	J. F. McLennan, <i>The Living Building Challenge 1.0</i>
2007	M. Braungart, W. McDonough und A. Bollinger, <i>Cradle to Cradle</i> [39]
2008	J. Birkeland, <i>Positive Development</i> [57]
2010	E. MacArthur, Gründung der Ellen MacArthur Foundation Circular Economy [58]
2010	World Futures Council, <i>Regenerative Built Environment and City design studies</i>
2010	J. Fullerton, Gründung des The Capital Institute
2012	K. Raworth, A safe and just space for humanity. Can we live within the Donought?, Grundlage für die Entwicklung der <i>Donut-Ökonomie</i> [59]
2013	Regenesys Group, startet die <i>The Regenerative Practitioner</i>
2019	A. Hillebrandt, Gründung der Initiative <i>Architects for Future</i> [60]
2020	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), <i>Klimapositiv: Jetzt!</i> , dient als Rahmenwerk für klimaneutrale Gebäude und Standorte [61]
2021	Europäische Kommission, <i>Neues Europäisches Bauhaus</i> [62]

Im Zeitraum von 1880 bis ca. Mitte des 20. Jahrhunderts beschäftigen sich erste Ansätze mit der Definition grundlegender Begriffe zum ökologischen Bauen. So beschreibt E. Howard im Jahre 1880 bereits eine Stadt, in der Menschen in Harmonie mit der Natur leben. Darauf aufbauend werden essenzielle Begriffe definiert und systematische Grundlagen entwickelt, wie beispielsweise eine Definition des Begriffs *Ökosystem* (1935), Entwicklung der Ansätze *Fundamentals of Ecology* (1953) und *General System Theorie* (1968). Anschließend werden die Grundlagen aufgegriffen und konkretere Ansätze zum ökologischen Bauen formuliert. I. McHarg veröffentlicht ein bedeutendes Lehrbuch für die ökologische Sichtweise der urbanen Landschaftsgestaltung *Design with Nature* (1969), aus der sich die ökologische Nachhaltigkeit entwickelt. J. T. Lyle liefert mit der Veröffentlichung seines Buches, *Design of Human Ecosystems*, die Grundlage für die spätere Entwicklung des Ansatzes *Regenerative Design* (1994).

Mit Beginn des 21. Jahrhunderts werden die theoretischen Ansätze gebäudespezifisch weiterentwickelt, wobei Ansätze zum positiven Bauen an Bedeutung gewinnen. Dies zeigt sich darin, dass die vorherigen Grundlagen konkretisiert und systematisch in Bezug auf die gebaute Umwelt weiterentwickelt und angewendet werden. Im Jahr 2006 entsteht beispielsweise das Zertifizierungssystem *The Living Building Challenge 1.0* des International Living Future Institute. Mit Braungart et al. entsteht im Jahr 2007 ein Ansatz für eine durchgängige und konsequente Kreislaufwirtschaft *Cradle to Cradle*, welches wiederum die Grundlage für das produktspezifische Zertifizierungssystem *Cradle to Cradle Certified* darstellt [63]. Die Kreislaufwirtschaft wird außerdem von E. MacArthur im Jahre 2010 aufgegriffen, welche darauf aufbauend die *Ellen MacArthur Foundation Circular Economy* gründet.

Mit den Themen des positiven Bauens und der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen wird auch auf universitärer Ebene begegnet. So macht es sich beispielsweise der Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München zum Mission-Statement, zum Bauen mit einem positiven ökologischen Fußabdruck zu forschen und Umsetzungsstrategien zu entwickeln [64]. Es bilden sich auch Initiativen, wie bspw. Ortsgruppen der *Cradle to Cradle NGO* und den *Architects for Future*, an denen sich Teilnehmende ehrenamtlich beteiligen und zum politischen Handeln auffordern [60]. Insbesondere in München zeigt die Kooperation zwischen den beiden Ortsgruppen, wie Forderungen an die Politik zum Umsetzen von Aspekten des positiven Bauens formuliert und kommuniziert werden kann. Im Rahmen der Kommunalwahlen 2020 in München, wurden konkrete Forderungen an die Politik gestellt und über eine Website öffentlich zugänglich gemacht. Zu finden sind die Forderungen und Maßnahmen unter www.muenchen2020.org [65]. Überdies entstehen neue Start-ups, wie z. B. die *vesta sustainability consulting UG* [66], die eine lebenszyklusbasierte positive ökologische Planung von Gebäuden in die Baupraxis tragen.

4.2 Überblick und Vergleich verschiedener Konzepte

Öko-Effizienz

Der Ansatz der Öko-Effizienz wurde zum ersten Mal vom Weltwirtschaftsrat für Nachhaltige Entwicklung (en: World Business Council for Sustainable Development) (WBCSD) im Jahre 1991 definiert. Der WBCSD definiert die Öko-Effizienz dabei als einen Ansatz zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse (z. B. nach Konsum und nach Dienstleistungen), wobei die ökologischen Auswirkungen und der Ressourcenverbrauch schrittweise reduziert werden, um die natürlichen biologischen Kapazitäten der Erde nicht zu überschreiten. [9] Insbesondere die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (en: Organization for Economic Cooperation and Development) (OECD) formuliert das Ziel, negative Umweltwirkungen durch technische Innovationen zu reduzieren. [67]

Entscheidend ist dabei das Bereitstellen von Waren und Dienstleistungen zur Deckung von Bedürfnissen und die technische Optimierung und Reduktion von negativen Umweltwirkungen. Es besteht ein starker Fokus auf technische Lösungen, wobei ein systematisches Umdenken nicht thematisiert wird. Dies zeigt sich darin, dass die Notwendigkeit des Konsums nicht hinterfragt wird. Nicht betrachtet werden Aspekte der Suffizienz (beispielsweise genügsamer Umgang und freiwilliger Verzicht auf übermäßigen Konsum) und es bestehen auch keine Bestrebungen positive Umweltwirkungen zu erzielen, was auch Braungart et al. [39] kritisieren und zu einem Umdenken aufrufen.

Hinsichtlich des Bausektors bildet dieser Ansatz die Grundlage für das aktuell geltende Baurecht und die Gebäudeplanung. Der limitierte Betrachtungshorizont zeigt sich darin, dass im Gebäudeenergiegesetz (GEG) nur der Primärenergiebedarf reduziert wird [54]. Maßnahmen zur Schonung endlicher Ressourcen, wie beispielsweise die Verwendung von erneuerbaren Energien und nachwachsenden Rohstoffen, werden vernachlässigt.

Cradle to Cradle

Das Konzept *Cradle to Cradle* nach W. McDonough und M. Braungart [8] stellt im Gegensatz zur Öko-Effizienz einen Ansatz dar, der die Reduktion von negativen Umweltwirkungen „weniger schlecht“ als nicht erstrebenswert hält. Vielmehr wird gefordert, dass Produkte, Dienstleistungen und die gebaute Umwelt lebenszyklusbasierte positive ökologische Wirkungen haben sollen. Das lineare Denken im Öko-Effizienz Konzept *Cradle to Grave* („von der Wiege bis zur Bahre“) wird dabei kritisiert und der Kreislaufgedanke im Sinne von *Cradle to Cradle* („von der Wiege bis zur Wiege“) gefordert. Insbesondere der Aspekt, dass Materialien nach deren Lebenszyklus als Abfall und im schlimmsten Fall als Sondermüll oder Gift deklariert werden, ist Anlass ein Umdenken zu fordern. Grundlage für dieses Konzept besteht in den zwei Kreisläufen, dem biologischen und dem technischen (siehe Abbildung 4.1 auf Seite 19).

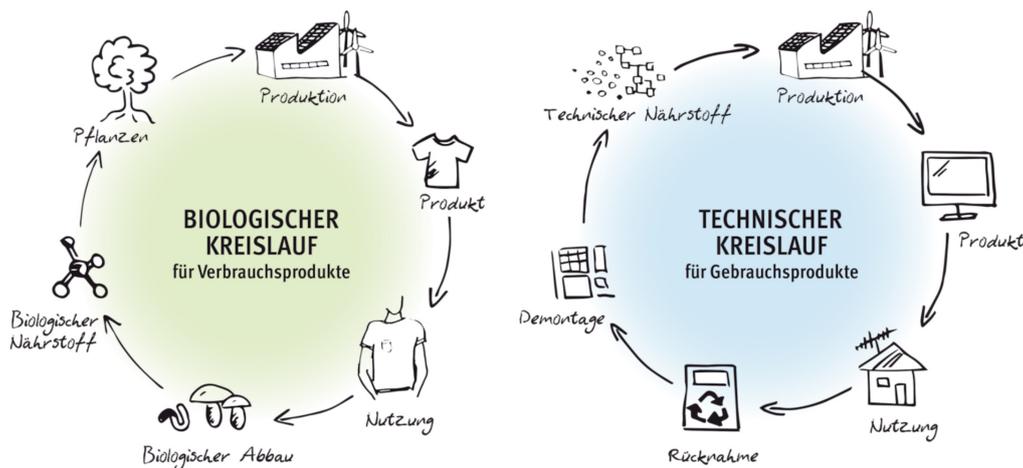


Abbildung 4.1 Darstellung des biologischen und technischen Kreislaufes nach dem Cradle to Cradle Konzept (Quelle: [68])

Bezogen auf den Bausektor bedeutet dies die Umsetzung folgender Prinzipien:

- Umsetzung kreislaufgerechter Materialien und Konstruktionen zur Schonung natürlicher Ressourcen
- Die Verwendung und Erzeugung von erneuerbaren Energien und die Vermeidung fossiler Energieträger
- Förderung der biologischen, der soziokulturellen und der konzeptionellen Vielfalt.

Restorative Design

Restorative Design bezieht sich auf einen Ansatz in der Architektur und Stadtplanung, der darauf abzielt, die natürliche und gebaute Umwelt zu verbessern und wiederherzustellen, während das Wohlergehen von Gemeinschaften und Ökosystemen gefördert wird. Es geht darum, nachhaltige und widerstandsfähige Designs zu schaffen, die die negativen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten mindern und das Gleichgewicht und die Harmonie in der Umgebung wiederherstellen. Dabei wird davon ausgegangen, dass menschliche Aktivitäten negative Auswirkungen auf die natürliche Umwelt haben [69]. Dieser Ansatz berücksichtigt besonders den Einklang zwischen Mensch und Natur. Reed und Braun et al. definieren den Begriff *Restorative Design* als einen Ansatz, bei dem lokale natürliche Systeme in einen gesunden Zustand der Selbstorganisation zurückgeführt werden [12, 70]. Grundsätzlich baut dieser Ansatz auf der ökologischen Nachhaltigkeit auf und bezieht den Zustand ökologischer Systeme und ethische Aspekte mit ein. Dies stellt ein Paradigmenwechsel in Bezug auf die menschliche Gesellschaft und den Wert der Natur dar. Unter diesen Begriff fallen weitere Ansätze, wie etwa das *Biophilic Design* (Biophilie beschreibt die „Liebe zum Lebendigen“ [71]) und *Biomimicry* (beschreibt die Praxis von den in der Natur gefundenen Strategien zu lernen, diese nachzuahmen und damit Designherausforderungen zu lösen [72]) [70]. Im Hinblick auf die nachhaltige Entwicklung und dem Ziel des *Regenerative Design* stellt das *Restorative Design* einen notwendigen Schritt und eine Zwischenlösung dar. Nach Braun et al. reicht es nicht aus, soziale und ökologische Systeme wiederherzustellen, sondern das Ziel soll die Erreichung einer regenerativen Beziehung zwischen Mensch und Natur sein [70].

Für das nachhaltige Bauen bedeutet dies die Erweiterung des bisherigen Betrachtungshorizonts und die Umsetzung von Maßnahmen zur Kompensation nicht vermeidbarer Umweltwirkungen.

Positive Development

Im Jahre 2008 publizierte Birkeland ihr Buch zum Ansatz *Positive Development* mit dem Titel *Positive Development: From Vicious Circles to Virtuous Cycles through Built Environment Design* [57]. Das Konzept *Positive Development* sieht sich als eine natürliche Entwicklung, welche über den ganzen Lebenszyklus positive Nettowirkungen in Bezug auf den vorigen Zustand erreicht. Dies wird dadurch erreicht, dass die wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Potenziale erhöht werden. Die Grundlage für die Entwicklung dieses Konzepts basiert maßgeblich auf dem Brundtland-Bericht [73], wobei Birkeland notwendige Aspekte identifiziert, die weiter entwickelt werden müssen. So kritisiert sie unter anderem Aussagen, dass die Belastungsfähigkeit der Erde noch nicht erreicht worden seien, negative Umweltwirkungen für selbstverständlich gehalten wurden, um eine ökonomische Entwicklung zu gewährleisten und dass negative Umweltwirkungen durch mehr Wissen und technologische Entwicklung verringert werden können. Birkeland greift den Ansatz der Nachhaltigkeit auf und entwickelt diesen weiter, wobei das ökologische Ziel einen Design- und Planungsansatz darstellt, der in der Lage ist, natürliche Kapazitäten zu erhöhen und damit erneuerbaren Ressourcen bereitzustellen. Hierzu formuliert sie folgende Design-Prinzipien:

- Urbane Systeme sollen offen gestaltet werden und im Ressourcentransfer mit ihrem Umland in Verbindung stehen
- Mehrfachnutzung des Raums für natürliche, wohnliche, wirtschaftliche und soziale Funktionen
- Bau- und Planungslösungen und deren Auswirkungen müssen ganzheitlich betrachtet werden
- Ökologische Sanierung ist dem Neubau vorzuziehen
- Urbane Gebiete sollen sich zum einen ökologisch selbst erhalten und bezüglich Nahrungsmitteln, Wasser und Energie ökologisch produktiv sein
- Entwürfe und deren Umsetzung müssen anpassbar und rückbaubar sein

Regenerative Design

Auf dem *Restorative Design* aufbauend, beschreibt das Konzept *Regenerative Design* einen philosophischen, qualitativen und ganzheitlichen ökologischen Design- und Denkansatz. Dieser fokussiert sich nicht nur darauf, Ökosysteme wiederherzustellen, sondern unterstützt die Umwelt und Ökosysteme in ihrer Entwicklung. Das grundlegende Konzept wird in mehreren Studien von Reed [12], Mang [42] und DuPlessis [43] als eines beschrieben, bei dem Menschen und Natur ein integriertes System bilden und einander unterstützen. Der Designprozess zielt darauf ab, bewusst die anthropogen verursachten Schäden zu kompensieren und Ökosysteme in einen natürlichen Zustand zurückzuführen. Die Regeneration der Gesundheit der Menschen und der lokalen Ökosysteme ist ein interaktiver Prozess. Dabei unterstützt jeder den anderen in einer für beide Seiten vorteilhaften Weise. Diese vitale und lebensfähige Wechselbeziehung ist der Beginn eines Wiederherstellungsprozesses für das ganze System [12].

Zusammenfassend, lassen sich für das *Regenerative Design* folgende Grundprinzipien formulieren:

- Nachhaltige Kreisläufe: Regeneratives Design strebt danach, geschlossene Kreisläufe zu schaffen, in denen Ressourcen effizient genutzt werden und Abfälle als Nährstoffe für andere Prozesse dienen. Es geht darum, das Konzept von Abfall zu überwinden und stattdessen die Idee einer kontinuierlichen Wiederverwendung und Regeneration zu fördern.
- Förderung von Vielfalt und Resilienz: Regeneratives Design setzt auf die Förderung von Biodiversität und Resilienz in Ökosystemen und Gemeinschaften. Es zielt darauf ab, die natürliche Vielfalt zu schützen und wiederherzustellen, um robustere und widerstandsfähigere Systeme zu schaffen, die sich den Veränderungen anpassen können.
- Positive Wirkung auf Mensch und Umwelt: Regeneratives Design strebt danach, einen positiven Einfluss auf Mensch und Umwelt auszuüben. Es geht über die Minimierung von negativen Auswirkungen hinaus und strebt an, dass unsere gebaute Umwelt aktiv zur Förderung des Wohlbefindens von Menschen und zur Gesundheit der Umwelt beiträgt. Es fördert soziale Gerechtigkeit, nachhaltige Lebensstile und eine enge Zusammenarbeit mit den lokalen Gemeinschaften.

Vergleich der Konzepte

Beschrieben wurden der konventionelle Ansatz der Öko-Effizienz und die Ansätze zum positiven Bauen. Die schematische Einordnung dieser Ansätze ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der konventionelle Ansatz der heutigen Gebäudeplanung ressourcenintensiv und eindimensional ist. Geprägt ist dieser Ansatz von einem anthropozentrischen Weltbild. Das Design von Gebäuden ist primär an den Bedürfnissen des Menschen ausgerichtet wobei Aspekte des Klima- und Umweltschutzes unzureichend berücksichtigt werden. Dies zeigt sich darin, dass in der Gebäudeplanung nur die Energieeffizienz berücksichtigt wird. Diese eindimensionale Betrachtung führt dazu, dass nur punktuelle Lösungen geliefert werden. Ein lebenszyklusbasierter und/oder mehrdimensionaler Ansatz unter Berücksichtigung von Ökosystemen fehlt.

Konzepte zum positiven Bauen brechen die eindimensionale Betrachtung auf und legen den Fokus auf eine mehrdimensionale Betrachtung von Mensch, Gebäude und Natur. Die Konzepte *Cradle to Cradle*, *Restorative* und *Regenerative Design* fokussieren sich auf positive Umweltwirkungen. Der Unterschied zwischen den drei Ansätzen liegt darin, dass diese auf unterschiedliche Art positive Umweltwirkungen erzielen. *Cradle to Cradle* setzt auf der Produktebene auf ein konsequentes Kreislaufsystem, während der Restorative Ansatz die positiven Wirkungen dadurch erzielt, dass geschädigte Ökosysteme wiederhergestellt werden. Somit wird ein maßgeblicher Beitrag zum Erhalt von Ökosystemdienstleistungen und der Biodiversität geliefert. Das Konzept von *Regenerative Design* stellt einen umfassenden Ansatz dar, der eine Verbindungen zwischen allen Komponenten der bebauten Umwelt herstellt. In Bezug auf das nachhaltige Bauen liefert das Konzept *Restorative Design* geeignete Ansätze zur Kompensation negativer Umweltwirkungen und zur Wiederherstellung von Ökosystemen.

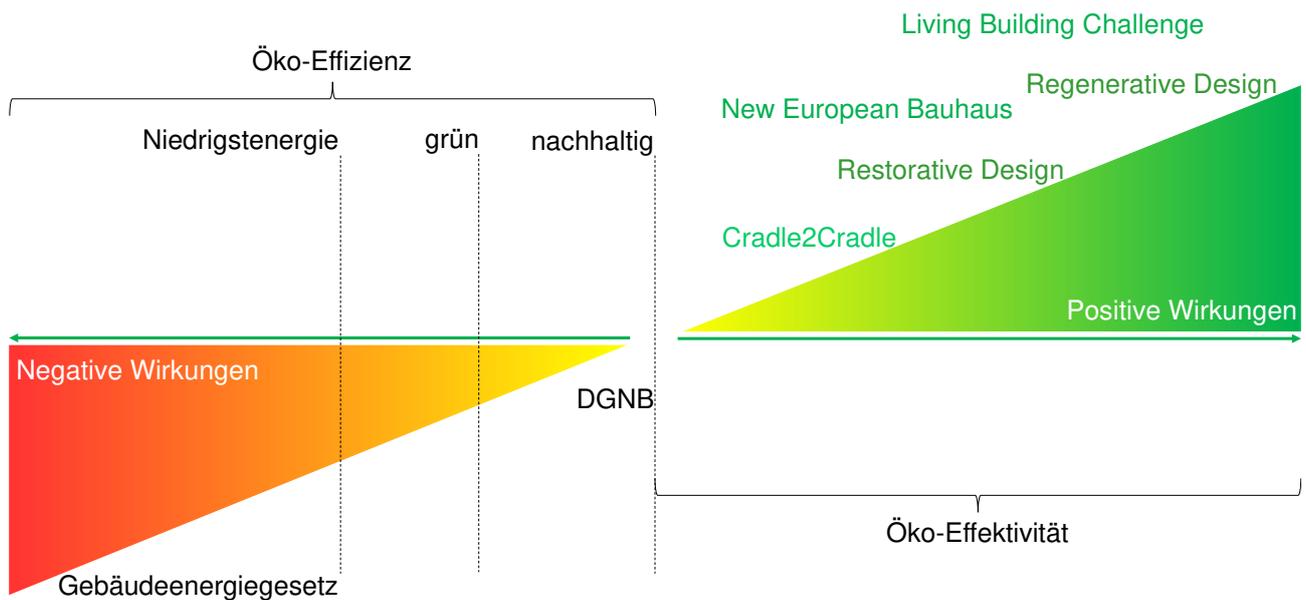


Abbildung 4.2 Schematische Darstellung und Einordnung von Ansätzen zur Öko-Effizienz und Öko-Effektivität anhand der negativen oder positiven Wirkung (Quelle: in Anlehnung an [42]; stark modifiziert)

In Abbildung 4.2 ist die schematische Einordnung von Ansätzen zur Öko-Effizienz und Öko-Effektivität in Bezug auf negative oder positive Wirkungen dargestellt. Exemplarisch sind für den Ansatz der Öko-Effizienz die Ziele von Niedrigstenergiegebäuden, grünen Gebäuden und nachhaltigen Gebäuden aufgeführt. In Bezug auf die Gebäudeplanung zeigt sich hierbei, dass das GEG deutlich im Bereich der negativen Wirkungen anzusiedeln ist. Durch die formulierten Anforderungen und die limitierte Betrachtung des Gebäudes werden hierbei die ökologischen Wirkungen nur reduziert und erreichen dabei keine ganzheitlichen positiven Wirkungen. Auch über die baurechtlichen Mindestanforderungen hinausgehende Zertifizierungen, wie die Zertifizierung der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) erreichen mit dem definierten Ziel der Nachhaltigkeit im besten Fall nur ein neutrales Gebäude. Positive Wirkungen können nur durch Konzepte der Öko-Effektivität erreicht werden. Exemplarisch sind hierbei die bereits beschriebenen Konzepte aufgeführt. Des Weiteren sind in Anlehnung an die Studie von Pedersen Zari [69] die Merkmale der unterschiedlichen Konzepte in Tabelle 4.2 auf Seite 23 dargestellt. Pedersen Zari analysiert die Merkmale der bestehenden Konzepte in Bezug auf den konventionellen Ansatz, *Öko-Effizienz*, *Cradle to Cradle*, *Restorative Design* und *Regenerative Design*.

Tabelle 4.2 Vergleich der Merkmale beschriebener Konzepte zum positiven Bauen in Bezug auf die Gebäudeebene (Quelle: in Anlehnung an [69]; leicht modifiziert)

Ansatz	Gebäudeebene
Konventionell	<ul style="list-style-type: none"> Ressourcen intensiv Design am Menschen ausgerichtet Steigernder Fokus auf Energieeffizienz teilweise Einbeziehung der Stadtgestaltung
Öko-Effizienz	<ul style="list-style-type: none"> Liefert nur Lösungen für einzelne Probleme (z. B. Reduktion des Energiebedarfs) Fokus auf einzelne Gebäude Reduktion negativer Umweltwirkungen Reduktion Energiebedarf
Cradle to Cradle	<ul style="list-style-type: none"> Fokus auf positiven Umweltwirkungen Mehr prozess- als gebäudeorientiert Schaffung von geschlossenen Kreisläufen Produkte sollen keinen Abfall aufweisen oder 100 % kreislaufgerecht sein Erzeugt einen positiven ökologischen Fußabdruck Förderung der biologischen Vielfalt, der soziokulturellen Vielfalt und der konzeptionellen Vielfalt Maximierung von nachhaltigen Ressourcen (z. B. Verwendung erneuerbarer Energien)
Restorative Design	<ul style="list-style-type: none"> Fokus auf positive Umweltwirkungen Ökosysteme werden wiederhergestellt Gebäude wird als Bestandteil eines größeren Umweltsystems gesehen Gebäude interagieren mit lokalen Ökosystemen
Regenerative Design	<ul style="list-style-type: none"> Fokus auf positiven Umweltwirkungen Fokus auf innovative Bauweisen, bei denen die einfachste Lösung im Vordergrund steht Gebäude sind auf die lokale Umgebung abgestimmt Förderung von Ökosystemen

In der Gegenüberstellung der genannten Konzepte von Pedersen Zari sind die verschiedensten Vorteile aufgelistet (siehe Abbildung 4.3). In Bezug auf die konventionelle Herangehensweise stellt Pedersen Zari fest, dass der Vorteil darin liegt, dass im funktionierenden Rahmen der aktuellen Denkweisen gehandelt wird. Über den konventionellen Ansatz hinaus weisen die untersuchten Konzepte eine reduzierte Umweltwirkung, Verbesserung der menschlichen Gesundheit und des psychologischen Wohlbefindens auf. Weitere Aspekte stellen die reduzierten Lebenszykluskosten und der erhöhte ökonomische Wert des Gebäudes respektive Objekts dar. Positive Umweltwirkungen (wie beispielsweise die Wiederherstellung von ökologischen Systemen) werden nur mit den Konzepten nach *Cradle to Cradle*, *Restorative- und Regenerative Design* erreicht, wobei eine Erweiterung des Betrachtungshorizonts zu Synergieeffekten führen kann. Des Weiteren können eine höhere Widerstandsfähigkeit, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit gegenüber dem Klimawandel geschaffen werden.

Konventionell	Ökoeffizienz	Cradle-to-Cradle	Restorative	Regenerative	Vorteile
					Funktioniert im Rahmen der aktuellen Planungspraxis
					Reduzierte Umweltwirkungen
					Verbesserung der menschlichen Gesundheit
					Verbessertes psychologisches Wohlbefinden
					Reduzierte Lebenszykluskosten
					Erhöht den ökonomischen Wert des Projekts
					Zunehmende Innovation bei Projekten
					Positive Umweltauswirkungen
					Gebäude werden zu einer potenziellen Einkommensquelle
					Wandel der Naturverbundenheit "tiefer und dauerhafter"
					Bedeutsamer Ansatz für globale Fragen durch einen standortbezogenen Ansatz
					Stärkere Integration in die Umgebung
					Synergieeffekte zwischen Menschen und der Umgebung
					Mehr Widerstandsfähigkeit, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit in Bezug auf den Klimawandel
					Schaffung stärkerer und gleichberechtigter Gemeinschaften
					Verstärkte Beachtung baukultureller Aspekte

Abbildung 4.3 Vergleich untersuchter Konzepte im Hinblick auf deren Mehrwerte (Quelle: in Anlehnung an [69]; leicht modifiziert)

4.3 Paradigmenwechsel im Gebäudesektor

Es wird nach wie vor versucht, Klima- und Umweltschutz mit Ansätzen der Öko-Effizienz zu lösen. Im Gebäudesektor trat 1977 die erste Wärmeschutzverordnung (WSV) [74] in Kraft welche zum Ziel hatte, den Energieverbrauch von Gebäuden durch Reglementierung des baulichen Wärmeschutzes zu reduzieren. Die stetige Weiterentwicklung der Verordnungen führte im Jahr 2002 zur Einführung der ersten Energieeinsparverordnung (EnEV) [75], welche neben dem baulichen Wärmeschutz auch Anforderungen an den maximal einzuhaltenden Energiebedarf des Gebäudes stellt. Darauf aufbauend ergänzt das aktuell gültige Gebäudeenergiegesetz (GEG) zusätzlich die Nutzung erneuerbarer Energien [54]. Der direkte Vergleich zeigt, dass sich über einen Zeitraum von 43 Jahren das grundlegende Narrativ der gesetzgebenden Verordnungen nicht geändert hat. Außerdem wird im Rahmen der Nachweisführung und Energiebilanzierung gemäß GEG nur die Nutzungsphase des Gebäudes betrachtet. Ein lebenszyklusbasierter Ansatz, unter Berücksichtigung der grauen Energien und Emissionen des Gebäudes für Herstellung, Austausch und Rückbau fehlt. Die Lebenszyklusanalyse gemäß DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen [13], DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen [5] und DIN EN 15978 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode [4] wird lediglich auf freiwilliger Basis als Sonderleistung oder im Rahmen von Zertifizierungen, z. B. bei der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) im Kriterium ENV1.1 Ökobilanz [76] in der Gebäudeplanung angewendet. Den Ansatz der Effizienzsteigerung wird von vielen Studien kritisiert, da dadurch die negativen Umweltwirkungen nur reduziert werden [39, 40]. Dass es sich bei dem Paradigmenwechsel hin zum *Regenerative Design* um einen kulturellen Wandel handelt, zeigen die Studien von Reed, Du Plessis und Brandon [12, 43, 77]. Die Autor:innen führen an, dass bisher nur einzelne Teile von Systemen betrachtet wurden. Allerdings müssen Zusammenhänge innerhalb von Systemen auf eine integrierte Art und Weise betrachtet und verstanden werden. Dass es sich beim *Regenerative Design* noch um einen sehr theoretischen Ansatz handelt, zeigt Du Plessis und betont dabei, dass konkrete Umsetzungsstrategien entwickelt und dargestellt werden müssen [77]. Wie der Wandel in der Gebäudeplanung konkret vollzogen werden kann, zeigt R. Cole in der Studie *Transitioning from green to regenerative design* [78]. Cole führt positiv an, dass Bewertungs- und Zertifizierungsmethoden hinsichtlich ökologischer Gebäude weitgehend in Entscheidungsprozesse Einzug gehalten haben. Des Weiteren führt er an, dass grundsätzlich auf bestehenden technischen Strategien aufgebaut werden soll. Im Gegensatz dazu bieten diese Methoden und Bewertungsinstrumente noch wenig Erkenntnisse über das Verständnis und die Einbeziehung lokaler Ökosysteme und ihrer Prozesse. Für den Planungsprozess von Gebäuden müssen die nachfolgend genannten Themen verstanden und miteinander in Verbindung gebracht werden.

- Steigerung des Systemdenkens
- Betrachtung von Gebäuden im größeren Kontext (beispielsweise Stadtquartier)
- Wechselwirkungen zwischen lokalen und globalen Systemen

Die Notwendigkeit zur Erweiterung des Betrachtungshorizonts auf große Gebäudebestände, Stadtquartiere und Städte zeigt die Dissertation von Harter [79]. Seine entwickelte Methode und die programmierseitige Umsetzung im Tool *urbi+* (Urban improvement) ermöglicht die Quantifizierung der lebenszyklusbasierten Umweltwirkungen, Energiebedarfe und Lebenszykluskosten. Besonders im Hinblick auf die Zieldefinition

und dem Erreichen der Klimaneutralität auf städtischer Ebene stellt diese Arbeit eine bedeutende Grundlage dar.

Die Implementierung dieser Themen in der Planungspraxis liegt nicht nur auf strategischer Ebene, sondern in der Denkweise von Planungsbeteiligten. Der Wissenstransfer und die Sensibilisierung für diese Themen sind entscheidend. Dies wiederum hängt maßgeblich an einem Wandel des Weltbilds, weg von einem anthropozentrischen Denken hin zu einem Weltbild, in dem Menschen und Natur integral betrachtet werden. Um ein Verständnis für den systematischen Zusammenhang zwischen Gebäude und Umwelt zu schaffen, führt Cole die Entwicklung geeigneter Entwurfsstrukturen und Werkzeuge an. Wie wichtig die Interaktion und der Austausch zwischen der Öffentlichkeit und den Beteiligten eines Bauprojekts sein kann, zeigen Hoxie et al. [80]. Sie untersuchten drei verschiedenen Fallbeispiele (Bauprojekte, mit verschiedensten Nutzungen, wie Wohn-, Gewerbe- und Kommunalimmobilien) in den USA (South Carolina, Kansas und Alabama) in Bezug auf die Entwicklung von regenerativen Lösungen. Dabei zeigt sich bei jeder untersuchten Fallstudie, dass unterschiedliche Lösungen gefunden wurden. Die Autor:innen betonen, wie wichtig der örtliche Bezug und die verschiedenen Randbedingungen sind. Des Weiteren werden die verschiedenen Formen und die Bedeutung des Engagements innerhalb der Projektbeteiligten hervorgehoben. Die Autor:innen beschreiben, dass dies eine mögliche Alternative zum traditionellen (Top-down-) Entwicklungsansatz von Behörden, Kund:innen und Fachleuten darstellt. Ebenso wirken sich die Beiträge der Gemeinschaft und der sich daraus ergebende Dialog positiv auf die Gestaltung der Projekte aus und dienen als Grundlage für einen iterativen Prozess für die Planung, den Entwurf und die Umsetzung von Projekten. Durch den Dialog identifizieren sich die Projektbeteiligten mehr mit den Projektzielen, was für eine erfolgreiche Umsetzung der Projekte sorgt. Durch den iterativen Prozess werden die interdisziplinären Verbindungen gestärkt, was sich positiv auf Ideen, Motivation und die Entwicklung auswirkt.

Wie der Paradigmenwechsel konkret aussehen kann, zeigt die Studie von Pedersen Zari [69] aus dem Jahre 2009 am Fallbeispiel von Neuseeland. Hierbei zeigt sie anhand von verschiedenen Zeiträumen die Entwicklung und Integration von Konzepten zum positiven Bauen auf (siehe Abbildung 4.4 auf Seite 27). Unterteilt werden die Zeiträume in 5 Jahre (kurzfristig), 40 Jahre (mittelfristig), 80 Jahre (langfristig) und mehr als 80 Jahre. Ein wesentlicher Aspekt, der bereits heute ersichtlich ist, ist die Entwicklung des Cradle to Cradle Konzepts. Pedersen Zari konstatiert, dass Cradle to Cradle mittelfristig (40 Jahre) in einen regenerativen Ansatz einbezogen werden kann. Unter Berücksichtigung der Entwicklung, die dieses Konzept seither durchlaufen hat, kann festgestellt werden, dass dies bereits zum aktuellen Zeitpunkt (2022) stattgefunden hat.

	kurzfristig (5 Jahre)	mittelfristig (40 Jahre)	langfristig (80 Jahre)	extrem langfristig (> 80 Jahre)
Öko-Effizienz	Kann zu einer Weiterentwicklung der aktuellen Betrachtungsweise beitragen, was zu geringeren Umweltbeeinträchtigung führt.	Kann schrittweise entfallen, wenn sich die gesetzlichen Anforderungen ändern, Umweltfragen an Dringlichkeit gewinnen und sich die Erwartungen an die Wirkungen von Gebäuden ändern.		
Cradle-to-Cradle	Kann zu einem Umdenken und zu mehr realisierten Projekten beitragen.	Kann in einen regenerativen Ansatz einbezogen werden.		
Restorative Design	Kann zu einem Umdenken und zu mehr realisierten Projekten beitragen.	Kann in einen regenerativen Ansatz einbezogen werden.		
Regenerative Design	Kann zu einem Wandel im Hinblick auf die ökologischen Ziele beitragen. Einfachere Aspekte des regenerativen Designs können in Projekten implementiert werden.	Realisierte Demonstrationsprojekte können in Anzahl und Umfang zunehmen.	Die gebaute Umwelt kann erfolgreicher in die Ökosysteme integriert werden, was sich positiv auf die ökologische, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Gesundheit auswirkt.	Eine dynamische, vollständig nachhaltige gebaute Umwelt kann mit einer größeren ökologischen, wirtschaftlichen, sozialen und kulturellen Gesundheit entstehen. Ökosysteme und Indikatoren für die biologische Vielfalt können stabiler werden. Die gebaute Umwelt wird robuster, während sich das Klima weiter verändert.

Abbildung 4.4 Zeitlicher Verlauf der Implementierung von Konzepten zum positiven Bauen am Fallbeispiel Neuseeland (Quelle: [69])

Für die weitere Entwicklung und Etablierung von Konzepten zum positiven Bauen in der Gesellschaft und der Planungspraxis sieht Pedersen Zari die Öko-Effizienz als bedeutende Grundlage. Bis die alternativen Konzepte ausgereift und spezifische Umsetzungsstrategien entwickelt werden, ist die Öko-Effizienz kurzfristig von großer Bedeutung, da damit das Bewusstsein für die nachhaltige Entwicklung gesteigert und der Klima- und Umweltschutz aktiv vorangetrieben wird. Darauf aufbauend können der Klimawandel und die bevorstehende Ressourcenverknappung zur Beschleunigung der Transformation beitragen. Auf lange Sicht werden Konzepte zum positiven Bauen notwendig werden, da sie die Ökosysteme stärken und Umweltschäden, die durch gegenwärtige und frühere menschliche Handlungen entstanden sind, rückgängig machen oder beheben. Dabei ist die Realisierung von Demonstrationsobjekten von großer Bedeutung, da daran die notwendigen Prozesse und auch konkrete Umsetzungsstrategien aufgezeigt werden können. Dass der Paradigmenwechsel auch auf institutioneller Ebene stattfindet, zeigt die Initiative *Bauhaus der Erde*, welche die nachhaltige Transformation beschleunigen und mitgestalten möchte [81]. Gegründet wurde das *Bauhaus der Erde* von Hans Joachim Schellnhuber im Jahr 2019 als eine gemeinnützige Organisation, in Kooperation mit einem Konsortium an mehreren weiteren Initiierenden. Unter den Zielen, einer ökologischen, sozial gerechten und ästhetischen Bauwende wird die Vision eines Siedlungswesens, welches „... regenerativ, polyzentrisch, digital, inklusiv und schön ist“ formuliert [82]. Anhand der Vision zeigt sich, dass das ultimative Ziel in das Konzept des *Regenerative Design* passt. Hinsichtlich der Transformation und den

notwendigen Zwischenschritten werden Aspekte des Konzepts *Restorative Design* aufgegriffen. So werden die Verwendung nachwachsender Rohstoffe, die Wiederaufforstung und Renaturierung von Ökosystemen beschrieben. Des Weiteren wird explizit formuliert, dass sich das Bauhaus der Erde als „... Motor einer Bürgerbewegung, die ein neues Narrativ der Moderne in Bezug auf die gebaute Umwelt hervorbringt und geltend macht“ [82]. Die Initiative *Bauhaus der Erde* wird zudem von der Europäischen Union (EU) im Rahmen des *New European Bauhaus* aufgegriffen und als Bindeglied zwischen dem Europäischen Grünen Deal [21] und den Lebensräumen verstanden [62]. Der Fokus liegt dabei auf der Vernetzung und der Zusammenarbeit im Rahmen eines partizipativen Prozesses von Beteiligten, Wissenschaft, Technologie, Kultur und Praxis. Beteiligte werden zusammengebracht, um in einem interdisziplinären Austausch an Lösungen für zukünftige Lebensräume zu arbeiten. Hervorgehoben werden Einfachheit, Funktionalität, Kreislaufwirtschaft, Komfort und ästhetische Attraktivität. Die Umsetzung erfolgt dabei in drei Phasen. Im ersten Schritt wird gemeinsam an möglichen Ideen gearbeitet, im zweiten Schritt werden diese in konkreten Demonstrationsprojekten realisiert und im dritten Schritt wird das erarbeitete Wissen verbreitet.

4.4 Prinzipien ökologisch positiver Gebäude

In den vorherigen Kapiteln wurden die Grundlagen zum positiven Bauen beschrieben. Es wurde auf die Eigenschaften bestehender Konzepte und den notwendigen Paradigmenwechsel für die gebaute Umwelt eingegangen. Es zeigt sich dabei, dass die Konzepte in der bestehenden Form sehr theoretisch sind. Dies liegt daran, dass sich diese Konzepte nicht spezifisch auf den Bausektor beziehen, sondern Bezug auf das gesamte Weltbild von Menschen und Natur nehmen. Das folgende Kapitel dient dazu, Prinzipien zur Realisierung von ökologisch positiven Gebäuden aufzuzeigen. Die Studienlage und der wissenschaftliche Konsens hinsichtlich der Prinzipien in Bezug auf den Gebäudesektor ist dabei eindeutig. Basierend auf der Analyse der Konzepte der *Living Building Challenge* [83], der Veröffentlichung von Attia mit dem Titel *Regenerative and Positive Impact Architecture* [84], den Handlungsempfehlungen der *Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V.* [85] als auch die Forderungen der *Architects for Future* und *Cradle to Cradle* [65] ergeben sich folgende Handlungsfelder und Maßnahmen (siehe Tabelle 4.3 auf Seite 29).

Tabelle 4.3 Handlungsfelder und Merkmale ökologisch positiver Gebäude (eigene Darstellung)

Handlungsfeld	Merkmal
Energie	Hoher energetischer Standard Erneuerbares Energiekonzept Dezentrale Erzeugung erneuerbarer Energien Plusenergie
Materialien	Verwendung lokaler Materialien und Ressourcen Einsatz nachwachsender Materialien Herstellung geschlossener Kreisläufe Rückbaubarkeit Modularität
Wasser	Natürlicher Wasserkreislauf Suffizienter Umgang mit Wasser Aktives Wassermanagement Abwassermanagement Regenwassernutzung
Gesundheit	Schadstofffreie Materialien Natürliche Belüftung Natürliche Beleuchtung Hohe Luftqualität
Emissionen	Verwendung kohlenstofffreier Energieträger Gebäude als Kohlenstoffsenke Gebäude trägt zur Steigerung der lokalen Luftqualität bei
Umgebung	Natürliche und ökologisch bedeutende Orte werden geschützt Umsetzung urbaner Landwirtschaft Schutz von Land für Tier- und Pflanzenarten Menschenorientierte Gestaltung von Freiräumen Optimierung des öffentlichen Nahverkehrs Reduktion von Fahrzeugen
Biodiversität	Erhöhte lokale Biodiversität Positive Wirkung auf Ökosysteme

4.4.1 Energie

Ein zentraler Aspekt aller analysierten Quellen ist die Notwendigkeit eines hohen Wärmedämmstandards hinsichtlich des Energiebedarfs [65, 83–85]. Es wird konstatiert, dass der baurechtliche Mindeststandard, in Bezug auf den Energiebedarf von Gebäuden deutlich unterschritten werden muss; beispielsweise fordert die *Living Building Challenge* [83] eine Unterschreitung um -70 %. Zur Energieversorgung setzen

Ansätze zum positiven Bauen besonders auf die vollständige Verwendung von erneuerbaren Energien. Fossile Energieträger, wie Erdöl oder Erdgas, die maßgeblich zur Klimaerwärmung beitragen, sind dabei grundsätzlich kein Bestandteil. Dadurch, dass bei der erneuerbaren Energieerzeugung keine fossilen Brennstoffe verbrannt werden, entstehen in der Regel keine schädlichen Treibhausgasemissionen in Betrieb. Für den Klimaschutz und die Energiewende stellen, gemäß dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), die erneuerbaren Energien daher die wichtigste Energiequelle dar [86]. Dies gilt es auf Gebäudeebene für die Wärme- und Strombereitstellung zu nutzen. Eine nachhaltige Gebäudetechnik setzt dabei auf folgende grundlegenden Prinzipien [87]:

- Wärme erhalten
- Wärme effizient gewinnen
- Überhitzung vermeiden und Wärme abführen
- Effiziente Kombination aus natürlicher und mechanischer Lüftung
- Tageslicht nutzen
- Kunstlicht optimieren
- Strom effizient nutzen

In Bezug auf den Energiebedarf und die dezentrale Energiegewinnung stellen Plusenergiegebäude (ein Gebäude, das mehr Energie erzeugt als es verbraucht [88]) ein zu forcierendes Gesamtkonzept dar.

4.4.2 Materialien

Aufbauend auf einer nachhaltigen Energieversorgung, spielen die verwendeten stofflichen Ressourcen und die Baukonstruktion eine entscheidende Rolle. Entscheidender Faktor dabei ist die Verwendung von lokalen Ressourcen und Materialien. Hierdurch werden weite Transportwege, wie etwa Importe mit Flugzeug oder Schiff, reduziert. Des Weiteren wird dadurch auch die lokale Infrastruktur gestärkt und die Rohstoffgewinnung kann besser überprüft werden. Darauf aufbauend ist es wichtig, nachwachsende Rohstoffe im Gebäude zu verwenden. Im Gegensatz zu mineralischen Materialien wachsen diese nach, wodurch auch für zukünftige Generationen diese Rohstoffe bereitgestellt werden können. Damit wird der Raubbau an der Erde vermieden und es werden endliche Ressourcen geschont. Ein weiterer wichtiger Aspekt von nachwachsenden Rohstoffen stellt die bessere Möglichkeit zur Kreislaufwirtschaft dar. Wie in *Cradle to Cradle* dargestellt, können diese sowohl in einem technischen Kreislauf wiederverwendet, als auch in einem biologischen Kreislauf in die Natur zurückgeführt werden. Generell spielen (gemäß den untersuchten Quellen) geschlossene Kreisläufe und die Rückbaubarkeit von Gebäuden eine entscheidende Rolle.

4.4.3 Wasser

In Deutschland beträgt der Wasserverbrauch gemäß dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft in etwa 125 Liter Wasser pro Tag und Person [89]. Im globalen Kontext steigt das Risiko zur Wasserknappheit und Konflikten durch den hohen Wasserverbrauch [90–92]. Ausgewählte Autor:innen sind sich einig, dass die Ressource Wasser mehr Wertschätzung erfahren muss und es im Gebäudesektor mehr Maßnahmen zur Reduktion des Frischwasserverbrauchs und der Regenwassernutzung bedarf.

Ein zentraler Aspekt ist dabei das Wassermanagement hinsichtlich des Frischwasserverbrauchs und der Regenwassernutzung. Beispielhaft wird die Kaskadennutzung (mehrfache Nutzung des Frischwassers) in Kombination mit der Nutzung von Regenwasser aufgeführt (z. B. für Toilettenspülungen) [93]. Zudem werden gemäß [93] auch Klimaanpassungsmaßnahmen, wie beispielsweise die Integration von Grüner Infrastruktur, als Maßnahme präferiert, um somit den natürlichen Wasserkreislauf nicht zu stören, was sich positiv auf die lokalen Ökosysteme auswirkt.

4.4.4 Gesundheit

Gebäude mit positiver Wirkung auf die menschliche Gesundheit kennzeichnen sich durch mehrere zentrale Aspekte. Maßgeblich ist der Verzicht auf umwelt- und gesundheitsschädliche Bauprodukte. Dies kann durch die Verwendung von zertifizierten Bauprodukten, zum Beispiel nach dem natureplus-Standard [94] oder Cradle to Cradle Certified [63] gewährleistet werden. Darüber hinaus wird im Rahmen der Nutzung des Gebäudes eine natürliche Belüftung und natürliche Beleuchtung angestrebt. Zur Sicherstellung der damit einhergehenden Luftqualität bedarf es eines geeigneten Monitorings und einer Zertifizierung, beispielsweise nach der Zertifizierung des *International WELL Building Institute* [95].

4.4.5 Emissionen

In Bezug auf die entstehenden Emissionen kennzeichnen sich ökologisch positive Gebäude durch die Verwendung von kohlenstofffreien Technologien und dienen zusätzlich als eine Kohlenstoffsенke. Durch die Verwendung von nachwachsenden und kohlenstoffbindenden Materialien können ökologisch positive Gebäude einen maßgeblichen Beitrag zum akuten Klima- und Umweltschutz leisten. Dabei zeigt sich, dass weitere Emissionen, die zur Umweltwirkung des Treibhauspotentials, Eutrophierungs- und Versauerungspotenzial beitragen, noch nicht thematisiert werden. Dies zeigt die systematische Literaturrecherche von Theilig et al. [96]. Theilig analysierte verschiedenste Emissionsarten über den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden, die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben. Sie kommt zu dem Erkenntnis, dass Strategien bereits in frühen Planungsphasen entwickelt und angewendet werden müssen. Zudem darf der Fokus nicht allein auf Treibhausgasemissionen liegen, sondern es gilt weitere Gebäudeemissionen mit schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu berücksichtigen. Hierzu zählen:

- Einsatz kohlenstofffreier Technologien
- Gebäude als Kohlenstoffsенke
- Gebäude trägt zur Steigerung der lokalen Luftqualität bei

4.4.6 Umgebung

Die Erweiterung des Betrachtungshorizonts auf die Umgebung des Gebäudes eröffnet die Möglichkeit für vielfältige positive Effekte, die realisiert werden können. Dies zeigen Banihashemi et al. im Rahmen des Forschungsprojekts *Grüne Stadt der Zukunft* [97]. Die Autor:innen untersuchten verschiedenste Maßnahmen zur Grünen Infrastruktur, wie Baumpflanzungen, Fassaden- und Dachbegrünungen und die Entsiegelung von Freiflächen im Kontext der nachhaltigen Stadtentwicklung. Dabei zeigen die Autor:innen, dass grüne Maßnahmen effektive Mittel zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden, Steigerung

der Aufenthaltsqualität im Außenraum, zur Klimaanpassung und Steigerung der Biodiversität darstellen. Darüber hinaus zeigen Bauer et al., dass grüne Maßnahmen auch geeignete Maßnahme nur Kompensation von negativen Folgen von Nachverdichtung darstellen [98].

4.4.7 Biodiversität

In Bezug auf die Biodiversität steigern ökologisch positive Gebäude die Biodiversität und weisen eine positive Wirkung auf lokale Ökosysteme auf. Die Förderung der lokalen Biodiversität von Flora und Fauna stellt eine zentrale Maßnahme dar, insbesondere im städtischen Kontext. Ein wesentlicher Aspekt bei der Umsetzung von grünen Maßnahmen stellt die Nutzung von Synergieeffekten mit blauen Maßnahmen (Wassermanagement) dar, wie Well et al. in einer Analyse von verschiedenen gebauten Gebäuden zeigen [99]. Die Autor:innen konstatieren, dass durch neue Planungsansätze diese Synergieeffekte genutzt werden können, was wiederum zu einem positiven Effekt auf die lokale Biodiversität führt.

4.5 Kritische Auseinandersetzung mit bestehenden Ansätzen

In den vorherigen Kapiteln wurden die alternativen Ansätze zum positiven Bauen und ihre Eigenschaften dargestellt und erläutert. In Bezug auf die dargestellten Ansätze gibt es einige Studien, die diese Ansätze zum Teil kritisch hinterfragen und deren Anwendung und die suggerierten positiven Aspekte infrage stellen. Daher beschäftigt sich dieses Kapitel damit, die identifizierten wissenschaftlichen Studien aufzuarbeiten und deren zentralen Aussagen zusammenzufassen.

Die durchgeführte Literaturrecherche zeigt, dass es für das *Cradle to Cradle* Konzept auf Produktebene einige Quellen gibt, die diesen Ansatz hinsichtlich der konkreten Anwendung kritisch hinterfragen [100–103]. Für die weiterentwickelten Ansätze, wie *Restorative* und *Regenerative Design* konnten keine geeigneten Quellen identifiziert werden, die sich kritisch mit diesen Konzepten auseinandersetzen. Es konnten lediglich einzelne Aspekte in Studien identifiziert werden, wie etwa in der Studie von Du Plessis [77]. Hierbei wird darauf eingegangen, dass es sich beim *Regenerative Design* um einen theoretischen Ansatz handelt und weitere praktische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden müssen. Mit dem Ansatz nach *Cradle to Cradle* setzen sich Music [101], Massana et al. [102] und Taghizadegan [103] kritisch auseinander. In einer systematischen Literaturrecherche analysiert Music eine Vielzahl von wissenschaftlichen Quellen. Music identifiziert dabei maßgeblich zwei verschiedenen kritische Bereiche: zum einen die *Praktikabilität* und zum anderen das *Nachhaltigkeitskonzept*. Detaillierter analysieren Massana et al. das Denkkonzept hinsichtlich folgender Aspekte:

- Nährstoffmetabolismus und die Grenzen des Wachstums
- Biologischer Nährstoff-Stoffwechsel und ökologische Folgen
- Schließung von Kreisläufen und aktuelle Paradigmen

Massana et al. stellen fest, dass im Kreislaufkonzept das Bevölkerungswachstum unzureichend berücksichtigt ist. Besonders im Hinblick darauf, dass ein direkter Zusammenhang zwischen dem Materialverbrauch pro Person und dem Wirtschaftswachstum besteht. Die Autor:innen kritisieren dabei, dass Aspekte der Suffizienz zu wenig berücksichtigt werden. Ebenso kritisieren sie den biologischen Kreislauf und weisen darauf hin, dass einige Studien belegen, dass der Eintrag von großen Mengen an biologischen Nährstoffen

in das Ökosystem negative ökologische Auswirkungen haben kann. Sie konstatieren, dass biologische Nährstoffkreisläufe nur im kleinen Maßstab funktionieren können. Im großen Maßstab argumentieren die Autor:innen, dass geschlossene technische und biologische Kreisläufe zu gravierenden sozialen und infrastrukturellen Veränderungen führen und diese wiederum in Summe mit einem höheren Energieverbrauch verbunden sind (insbesondere aufgrund des gesteigerten logistischen Aufwands). Da die Studien von Music [101] und Taghizadegan [103] grundsätzlich zu denselben Ergebnissen kommen, werden im Folgenden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

- Unzureichende Definition, welche positiven Aspekte der Ansatz liefert
- Fehlende Quantifizierung
- Unzureichende Thematisierung von komplexen Zusammenhängen in Bezug auf Ökosysteme
- Potenzielle negative Wirkungen auf Ökosysteme werden nicht berücksichtigt, etwa durch übermäßiges zurückführen von Materialien und Produkte in den biologischen Kreislauf
- Cradle to Cradle birgt die Gefahr von politischer Planwirtschaft
- Gefahr zur Ermutigung von übermäßigem Konsum aufgrund fehlende Aspekte der Suffizienz
- Technische Aspekte werden unzureichend oder gar nicht berücksichtigt, (z. B. der hohe logistische Transport Aufwand für einen geschlossenen technischen Kreislauf)

Abschließend lässt sich feststellen, dass es noch recht wenige umfassende Studien gibt, die sich kritisch mit den Konzepten zum positiven Bauen auseinandersetzen.

4.6 Kurzzusammenfassung

Das positive ökologische Bauen stellt ein breites Narrativ dar, unter welchem sich verschiedene Ansätze eingliedern. Hierzu zählen insbesondere die Konzepte *Cradle to Cradle*, *Restorative Design* und *Regenerative Design*. Zentraler Aspekt aller Konzepte ist das Streben nach Gebäuden mit positiven Wirkungen auf Menschen und Natur. Im direkten Bezug auf den Gebäudesektor lassen sich folgende Handlungsfelder identifizieren:

- Energie
- Material
- Wasser
- Gesundheit
- Emissionen
- Biodiversität

Ein wesentliches Problem aller Ansätze stellt der methodisch zu wenig entwickelte Charakter und die geringe technologische Reife dar. Studien kritisieren die fehlende Berücksichtigung der Suffizienz und besonders die fehlende Thematisierung der komplexen Zusammenhänge von Wirkungen auf Ökosysteme.

5 Stand der Technik und Forschung

Aufbauend auf den Grundlagen zum positiven Bauen aus Kapitel 4 behandelt dieses Kapitel den Stand der Technik und Forschung. Im Stand der Technik wird darauf eingegangen, inwiefern Aspekte zum positiven Bauen bereits in der Gebäudeplanung implementiert sind (siehe Kapitel 5.1). Darauf aufbauend behandelt das Kapitel 5.2 den Stand der Forschung. Hier wird der aktuelle Stand hinsichtlich der Einordnung von Berechnungsergebnissen von Lebenszyklusanalysen (LCA) und deren Wirkung auf Ökosysteme reflektiert.

5.1 Positives Bauen in der Gebäudeplanung

5.1.1 Baugesetzbuch (BauGB)

Im Rahmen des Baurechts wird in Deutschland die bauliche Nutzbarkeit von Grund und Boden im Bauordnungsrecht festgelegt. Die maßgeblichen Regelungen zum Bauordnungsrecht sind dabei im Baugesetzbuch (BauGB) [104] und in der Baunutzungsverordnung (BauNVO) [105] beschrieben. Die Belange des Umweltschutzes, Naturschutzes und der Landschaftspflege werden für Bauleitpläne im BauGB in Abschnitt 1 § 1 Absatz 7 BauGB formuliert. Gemeinden, die einen Bauleitplan aufstellen, sind in der Verantwortung festzustellen, ob ein Eingriff in Natur und Landschaft vorliegt. Dabei wird insbesondere auf die Auswirkungen auf Menschen, Tiere sowie terrestrische und aquatische Ökosysteme (Buchstabe a) und den Erhalt von Naturräumen (Buchstabe b) eingegangen. Gebäudespezifisch wird in Absatz 7 insbesondere auf die Vermeidung von Emissionen und Abfall (Buchstabe e), den sparsamen und effizienten Umgang mit Energie sowie die Nutzung von erneuerbaren Energien (Buchstabe f) und den Erhalt einer bestmöglichen Luftqualität (Buchstabe h) eingegangen. Ergänzend dazu wird im § 1a Abs. 2 BauGB definiert, dass mit Grund und Boden sparsam und schonend umgegangen werden soll. Des Weiteren wird definiert, dass zur Verringerung von baulich genutzten Flächen und damit einhergehend eine Vermeidung von Bodenversiegelung, eine Wiedernutzbarmachung, Nachverdichtung und andere bauliche Maßnahmen zu begrenzen sind. Ein wesentlicher Aspekt in der Erhaltung von Naturräumen liefert § 1a Abs. 4, wobei definiert ist, dass sofern die Erhaltungsziele für Naturräume beeinträchtigt werden, die Vorschriften des Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) anzuwenden sind. Für das Bauen im Außenraum ist zudem § 35 BauGB maßgeblich, bei dem ebenfalls die Belange des flächensparenden Bauens, Bodenversiegelung und des Naturschutzes thematisiert werden. Für die Vermeidung und den Ausgleich von Beeinträchtigungen ist § 1 Abs. 3 BauGB relevant. Dieser Abschnitt wurde im Rahmen der Novellierung des BauGB 1998 ergänzt [106]. Das Ergänzen dieses Artikels zeigt die steigende Bedeutung des Umweltschutzes und der Notwendigkeit zur Vermeidung und Kompensation [107]. In § 1 Abs. 3 BauGB findet sich ein direkter Verweis auf die Eingriffsregelung des BNatSchG.

5.1.2 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)

Das BNatSchG behandelt in Deutschland das Ziel des Naturschutzes und der Landschaftspflege [108]. Den formulierten Zielen liegt die Absicht zugrunde, Natur und Landschaft, die für Leben und Gesundheit für heutige Menschen und zukünftige Generationen als Grundlage dienen, zu schützen. Dabei werden vielfältige Ziele definiert, wie etwa der Erhalt der biologischen Vielfalt, der Erhalt der Leistungs- und Funktionsfähigkeit von Naturräumen, der Erhalt der Regenerationsfähigkeit etc. Ein wesentliches Problem bei den Definitionen der Schutzziele liegt in der generellen Unschärfe. Dies zeigt zum Beispiel die Untersuchung von Bruns, welche zum Ergebnis kommt, dass es nicht ersichtlich ist, was direkt geschützt werden soll [109]. Des Weiteren schreibt Bruns, dass die Ziele vom gesellschaftlichen Ermessen und politischen Grundströmungen abhängen. Dies zeigt sich auch insbesondere darin, dass im Rahmen der Entwicklungsschritte des BNatSchG, der Schutzgegenstand und die Wirkungsabschätzung an Breite und Komplexität zugenommen haben [109]. Eingriffe in die Natur und die damit einhergehenden potenziellen Beeinträchtigungen werden in § 13 und § 15 BNatSchG geregelt. Zunächst wird in § 13 BNatSchG definiert, dass Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft vom Verursachenden vorrangig zu vermeiden sind. Für die Umsetzung von Gebäuden ist dabei besonders § 14 BNatSchG relevant, welcher Eingriffe in die Natur und Landschaft behandelt. Eingriffe stellen Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen dar, welche Beeinträchtigungen hinsichtlich des Grundwasserspiegels, Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes oder des Landschaftsbilds aufweisen können. Aufbauend auf § 13 und § 14 BNatSchG behandelt § 15 BNatSchG die Verursacherpflichten im Zusammenhang mit Eingriffen in Naturräume. Hinsichtlich von möglichen vermeidbaren Beeinträchtigungen von Naturräumen gilt die Vermeidung gemäß § 15 Abs. 1 BNatSchG als zumutbar, wenn diese mit einer Alternative (mit demselben Zweck) umsetzbar ist. Sofern der Verursachende die Beeinträchtigungen durch eine mögliche Alternative nicht vermeiden kann, so gilt nach § 15 Abs. 2 BNatSchG die Pflicht "... unvermeidbare Beeinträchtigungen durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege auszugleichen (Ausgleichsmaßnahmen) oder zu ersetzen (Ersatzmaßnahmen)" [108]. Beeinträchtigungen sind dabei Eingriffe, welche die ökologische Funktion des Ökosystems stören und bei denen innerhalb einer kurzen Zeit keine Regeneration (Wiederherstellung in den Ursprungszustand) zu erwarten ist [107]. Das Vorgehen der Eingriffsausgleichsregelung wird im Folgenden beschrieben. Die Umsetzung des BNatSchG erfolgt auf Landesebene, wobei für Bayern das Bayerische Kompensationsverordnung (BayKompV) gilt.

5.1.3 Bayerische Kompensationsverordnung (BayKompV)

Ziel dieser Verordnung ist es, die naturschutzrechtlichen Anforderungen und Regelungen hinsichtlich der Eingriffe und der Ausgleichs- und Kompensationsmaßnahmen zu vereinheitlichen. Dabei ist besonders die Entwicklung von Biotopverbundsystemen und die Realisierung von zusammenhängenden Ausgleichsflächen von Bedeutung [110]. Der definierte Wirkraum gemäß § 3 und § 4 BayKompV der Verordnung umfasst Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Klima und Luft sowie das Landschaftsbild. Die Bewertung der Eingriffe und die notwendigen Ausgleichs- und Kompensationsmaßnahmen basieren auf dem *Biotopwertverfahren*. Erster Schritt im Biotopwertverfahren (Quantifizierung des Grundwerts), ist gemäß § 4 Abs. 3 Satz 1 BayKompV die flächenbezogene Bewertung der Schutzgüter (Arten und Lebensräume) in einer vierstufigen Bewertungsskala. Diese reicht von keiner naturschutzfachlichen Bedeutung bis gering, mittel und hoch. Als (*hoch*) werden seltene und naturnahe Ökosysteme, Biotope gemäß § 30 BNatSchG, Flächen mit sehr hohem

Biotopwert und Lebensraumtypen gemäß der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (Flora-Fauna-Habitat (FFH)-Richtlinie) [111] angesehen. Als (*mittel*) werden durch menschlich geprägte Ökosysteme und Flächen mit hohem Biotopwert angesehen. Naturferne und durch den Menschen beeinflusste Biotope, sowie Flächen mit mittlerem Biotopwert werden als (*gering*) eingeschätzt. Versiegelte Flächen, wie bspw. Straßen kommen *keine naturschutzfachliche Bedeutung* zu. Die Ermittlung des Grundwerts erfolgt anhand von ökologischen Wertepunkten, keine naturschutzfachliche Bedeutung (0), gering (1-5), mittel (6-10), hoch (11-15). Die Berechnung der Wertepunkte basiert dabei gemäß Anlage 1 Spalte 3 BayKompV auf folgenden Grundkriterien [112, 113]:

- G: Seltenheit / Gefährdung
- W: Wiederherstellbarkeit / Ersetzbarkeit
- N: Natürlichkeit

Für jedes Grundkriterium werden Wertepunkte von 0 bis 5 vergeben. Flächen, welche keine ökologische Wertigkeit besitzen und keine Lebensraumfunktionen aufweisen, werden mit 0 bewertet. Von 1 bis 5 steigt der naturschutzfachliche Wert an. Die gesamten Wertepunkte setzen sich gemäß Formel 5.1, als Summe aller Einzelkriterien, wie folgt zusammen:

$$\text{Grundwert} = G + W + N \quad (5.1)$$

Die Bewertung der *Seltenheit / Gefährdung* (G) (siehe Tabelle 5.1 auf Seite 38) basiert auf verschiedenen Einschätzungen, wie bspw. die landesweiten Ausprägungen, Einstufungen gemäß der Roten Liste (Liste mit weltweit vom Aussterben gefährdeter Tier- und Pflanzenarten) [114], Angaben gemäß der Biotopkartierung in Bayern [115] oder gemäß dem Handbuch der FFH-Lebensraumtypen [116]. Dargestellt ist die Wertestufe, Gefährdung, Seltenheit und mögliche zusätzliche Erläuterungen. Dabei wird der Naturraum hinsichtlich der Gefährdung eingestuft, wie stark dieser von der Vernichtung gefährdet ist und wie selten dieser vorkommt. Die Skala reicht von *nicht gefährdet* (Wertstufe 0) bis *vollständiger Vernichtung bedroht* (Wertstufe 5). Die Seltenheit des Naturraums wird eingestuft zwischen *sehr häufig* bis *äußerst selten*.

Tabelle 5.1 Einstufung des Bewertungskriteriums Seltenheit und Gefährdung (Quelle: [113])

Seltenheit/Gefährdung (G)			
Wertstufe	Gefährdung	Seltenheit	Zusatz
5	von vollständiger Ver- nichtung bedroht	äußerst selten bis selten	-
4	stark gefährdet	selten	-
3	gefährdet	selten bis häufig	-
2	nicht gefährdet	häufig	standortspezifisch, keine intensive Nutzung
1	nicht gefährdet	häufig bis sehr häufig	kaum standortspezifisch, intensi- ve Nutzung
0	nicht gefährdet	sehr häufig	nicht standortspezifisch, sehr intensi- ve Nutzung, ohne naturschutzfachli- che Bedeutung

Die Bewertung der *Wiederherstellbarkeit/Ersetzbarkeit (W)* (siehe Tabelle 5.2 auf Seite 39) basiert auf der Roten Liste [114] und Angaben des Bayerischen Landesamt für Umwelt hinsichtlich Entwicklungszeiträumen von Ausgleichs- und Kompensationsmaßnahmen [117] sowie Angaben des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft [118]. Beschrieben ist die Wertstufe, Wiederherstellbarkeit/Ersetzbarkeit und Entwicklungsdauer. Für die Naturräume wird nicht nur die Stärke der Wiederherstellbarkeit oder Ersetzbarkeit als Kriterium verwendet, sondern auch die dazu notwendige Entwicklungsdauer. Die Wiederherstellbarkeit oder Ersetzbarkeit reicht von *ohne naturschutzfachliche Bedeutung* (Wertstufe 0) bis *äußerst bis sehr gering* (Wertstufe 5), die bedeutet, dass der geschädigte Zustand oder die Beeinträchtigung so schwerwiegend ist, dass eine vollständige Wiederherstellung nur mit erheblichem Aufwand oder Kosten möglich ist. Äquivalent dazu wird eine Entwicklungsdauer für die Wiederherstellbarkeit angegeben. Diese liegt bei Naturräumen mit einer *gut bis sehr guten* Wiederherstellbarkeit bei < 5 Jahren und steigt an auf ≥ 80 Jahre bei Naturräumen mit einer *äußerst bis sehr geringen* Wiederherstellbarkeit.

Tabelle 5.2 Einschätzung zur Wiederherstellbarkeit und der notwendigen Entwicklungsdauer (Quelle: [113])

Wiederherstellbarkeit/Ersetzbarkeit (W)		
Wertstufe	Wiederherstellbarkeit/Ersetzbarkeit	Entwicklungsdauer
5	äußerst bis sehr gering / nicht bis schwer (langfristig) wiederherstellbar	≥ 80 Jahre
4	gering / schwer (langfristig) wiederherstellbar	26 - 79 Jahre
3	gering / bedingt (mittelfristig) wiederherstellbar	10 - 25 Jahre
2	mäßig gut / mäßig gut (Mittelfristig) wiederherstellbar	5 - 9 Jahre
1	gut bis sehr gut / gut (Kurzfristig) wiederherstellbar	< 5 Jahre
0	ohne naturschutzfachliche Bedeutung (versiegelte Flächen)	-

Die Natürlichkeit (N) stellt neben der Seltenheit/Gefährdung und der Wiederherstellbarkeit ein zentrales Kriterium zur Beschreibung der naturschutzfachlichen Bewertung dar. Naturräume werden dabei nach dem Maß des anthropogenen Einflusses beschrieben und bewertet (siehe Tabelle 5.3 auf Seite 40). Dabei ist zu beachten, dass Ökosysteme einer zeitlichen Veränderung unterliegen. Diese kann auf natürliche Änderungen als auch auf nicht natürlichen (anthropogene) Änderungen basieren. Heutige Ökosysteme weisen insbesondere aufgrund von früheren anthropogenen Einflüssen, irreversiblen Bodenveränderungen, Ausrottung von Arten, irreversible Änderungen der Atmosphäre eine veränderte Natürlichkeit auf. Dies zeigt sich etwa daran, dass in Europa natürliche Wälder nahezu vollständig fehlen. [16]

Im Rahmen der BayKompV werden Naturräume hinsichtlich des Natürlichkeitsgrad und der Hemerobiestufe bewertet. Beim Natürlichkeitsgrad und der Hemerobiestufe, gemäß Sukopp [119] und Klotz [120], wird der Zustand zwischen *künstlich* (metahemerob) bis *natürlich, naturnah* (ahemerob) unterschieden. Des Weiteren beruht die Bewertung auf der Biotopkartierung [115] und Angaben zu den FFH-Richtlinien [118, 121].

Tabelle 5.3 Einschätzung zur Natürlichkeit (Quelle: in Anlehnung an [113]; leicht modifiziert)

Natürlichkeit (N)				
Wertstufe	Natürlichkeitsgrad	Hemerobiestufe	Beispiele	menschlicher Einfluss
5	natürlich, naturnah	ahemerob, oliho-hemerob	nicht bis gering veränderte Naturräume, z. B. artenreiches Feucht- und Nassgrünland, Moore, Heiden	(fast) ohne anthropogene Einwirkungen
4	bedingt naturnah	mesohemerob	mäßig veränderte Naturräume, z. B. bedingt naturnahe Stillgewässer, mageres Extensivgrünland	mäßiger menschlicher Einfluss
3	bedingt naturfern	β-euhemerob	deutlich veränderte Naturraum, z. B. begrabte Fließgewässer, geschädigte Moore	mittlerer menschlicher Einfluss
2	naturfern	α-euhemerob	stark veränderte Naturräume, z. B. stark veränderte Fließgewässer, intensiv bewirtschaftete Äcker, Park- und Grünanlagen	starker menschlicher Einfluss
1	naturfremd	polyhemerob	sehr stark bis vollständig veränderter Naturraum, z. B. vollständig begrabte Fließgewässer, naturferne Abgrabungs- und Aufschüttungsflächen	sehr starker menschlicher Einfluss
0	künstlich	metahemerob	versiegelte Flächen	überaus starker menschlicher Einfluss

Der sich ergebende Kompensationsbedarf lässt sich gemäß BayKompV, nach Formel 5.2 ermitteln.

$$\text{Kompensationsbedarf} = \text{beeinträchtigte Fläche} \times \text{Wertpunkte} \times \text{Beeinträchtigungsfaktor} \quad (5.2)$$

Der Kompensationsbedarf setzt sich zusammen aus der beeinträchtigen Fläche in Quadratmeter [m²], den Wertepunkten im Ausgangszustand gemäß Formel 5.1 und dem Beeinträchtigungsfaktor. Der Beeinträchti-

gungsfaktor gibt die Intensität des geplanten Eingriffs an, wobei folgende Abstufungen angesetzt werden: 0 (nicht erheblich), 0,4 (gering), 0,7 (mittel) oder 1,0 (hoch). Abhängig vom ermittelten Kompensationsbedarf müssen geeignete Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen gemäß der BayKompV Anlagen 4.1 und 4.2 gefunden werden [122]. Anlage 4.1 der BayKompV bezieht sich auf die Schutzgüter Arten und Lebensräume und Anlage 4.2 auf Boden, Wasser, Klima/Luft und das Landschaftsbild. Beispiel für Kompensationen sind insbesondere die Entsiegelung und Wiedervernetzung von Biotopen, Renaturierung oder Entwicklung von Strukturen für die Artenvielfalt. Um eine sachgerechte Kompensation durchführen zu können, müssen geeignete Flächen zur Verfügung stehen. Gemäß dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz sind geeignete Flächen nur eingeschränkt vorhanden [123].

In Bezug auf die beschränkt zur Verfügung stehenden und geeigneten Flächen zeigt sich bereits seit mehreren Jahrzehnten die defizitäre Lage in der Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen [109, 124–129]. Schmidt et al. [127] untersuchten von Straßenbauvorhaben insgesamt 68 verschiedene, bereits durchgeführte Kompensationsmaßnahmen an Untersuchungsflächen. Die Kompensationsmaßnahmen erstrecken sich über einen Zeitraum von 1985 bis 1997. Ziel der Untersuchung war es, die spezifischen Kompensationsdefizite zu identifizieren. Es zeigt sich, dass Kompensationsmaßnahmen gar nicht mehr aufgefunden werden konnten oder es nicht mehr ersichtlich war, wo diese Maßnahme umgesetzt wurde. Des Weiteren lagen hauptsächlich bei den älteren Projekten teilweise keine Planunterlagen mehr vor und die Qualität der Dokumentation ist unzureichend. Insbesondere zeigt sich, dass die Dokumentation der Kompensationsziele und Umsetzung unzureichend formuliert ist. Dieser Umstand führte bei den untersuchten Projekten zu massiven Defiziten in Bezug auf die Erreichung der Kompensationsziele. Es zeigte sich sogar, dass Maßnahmen negative Auswirkungen auf Flora und Fauna haben. Schmidt et al. fassen zusammen, dass die angestrebten Ziele überwiegend nicht erreicht wurden und sogar Verschlechterungen zu erkennen waren. In einer weiteren Untersuchung von Ecker et al. [125] wurde untersucht, wie gut die Eingriffsregelungen funktionieren und welche Qualität die umgesetzten Maßnahmen aufweisen. In der Studie wurden 88 Ausgleichsflächen hinsichtlich der geforderten Kompensationsmaßnahmen analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4 Bewertung der Umsetzungsqualität von Kompensationsmaßnahmen (Quelle: [125])

Bewertung der Umsetzung	Anzahl der Flächen	Anteil
keine Umsetzung	39	44 %
schlechte Umsetzung	11	13 %
mittlere Umsetzung	17	19 %
gute Umsetzung	12	14 %
sehr gute Umsetzung	9	10 %
Gesamtsumme	88	100 %

Anhand der Untersuchungen zeigt sich, dass insgesamt 76 % der Ausgleichsflächen entweder gar nicht erst umgesetzt werden oder die Umsetzung eine schlechte bis mittlere Qualität aufweisen. Lediglich 28 % der analysierten Flächen weisen eine gute bis sehr gute Umsetzungsqualität auf. Ecker et al. schlussfolgern,

dass „[...] ohne eine Kontrolle die Umsetzungsrate und Qualität von Ausgleichsmaßnahmen erschreckend gering sind“ [125]. Hinsichtlich des Umweltschutzes und der Qualitätssicherung ist daher eine Kontrolle der umgesetzten Maßnahmen zwingend erforderlich. Tischew et al. [128] und Jessel et al. [129] zeigen, dass diese Thematik bereits seit Jahren diskutiert wird. Unter Berücksichtigung des Alters dieser Studien kann an dieser Stelle ein Versäumnis in der Umsetzung identifiziert werden.

Ein weiterer Aspekt der BayKompV sind Ökokonten. Ökokonten sind Instrumente, in denen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen „gespeichert“ und dann für zeitlich zukünftige Projekte verwendet werden können. Für Gemeinden bieten Ökokonten entscheidende Vorteile bei der Umsetzung von Gebäuden und der Realisierung von Bauleitplänen. Da in der Bauleitplanung auf die Ökokonten zurückgegriffen werden kann, wird das grundsätzliche Verfahren beschleunigt, was zu einer flexibleren und sicheren Planung und zur Stärkung der Handlungsspielräume führt. [130]

Ruff et al. untersuchten Maßnahmen von Ökokonten hinsichtlich ihrer naturschutzfachlichen Eignung und der Zielerreichung [131]. Insgesamt umfasste die Untersuchung 142 Maßnahmenkomplexe mit 480 einzelnen Ökokonten-Maßnahmen. Lediglich bei 22 der 142 Maßnahmenkomplexen wurden keine Mängel identifiziert. Die weiteren 120 untersuchten Maßnahmen wiesen mindestens geringe Mängel auf. Für die Umsetzung von ökologisch positiven Gebäuden bedeutet dies ein Defizit in den umgesetzten Kompensationsmaßnahmen.

5.1.4 Bundeskompensationsverordnung (BKompV)

In Ergänzung zu den Kompensationsverordnungen der Länder gilt auf nationaler Ebene die BKompV [132]. Das BKompV regelt dabei länderübergreifende Eingriffe in die Natur, hervorgerufen durch Energieleitungen, Eisenbahn, Infrastruktur etc. [133]. Eingriffe und die notwendigen Ausgleichsmaßnahmen werden dabei durch die im BKompV, Anlage 2 definierten Biotopwerte ermittelt. Die Anlage 2 und die Wertepunkte basieren auf der aktuellsten Rote Liste [114] und der FFH-Richtlinie 92/43/EWG [134]. Da sich das BKompV nicht direkt auf das Gebäude bezieht, wird es an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

5.1.5 Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Das national geltende Gebäudeenergiegesetz (GEG) [54] dient grundsätzlich dazu, die beiden europäischen Richtlinien EU 2010/31/EU zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [135] und die Energieeffizienzrichtlinie 2012/27/EU [136] umzusetzen. Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) führt dabei das bisher geltende Energieeinsparungsgesetz (EnEG), Energieeinsparverordnung (EnEV) und dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zusammen.

Die maßgebliche Anforderung aus der Richtlinie EU 2010/31/EU, gemäß Artikel 9 Satz 1 besagt, dass ab 01.01.2021 alle neuen Gebäude den Anforderungen eines Niedrigstenergiegebäude entsprechen müssen. Hierfür definiert die Richtlinie gemäß Artikel 2, Absatz 2 Niedrigstenergiegebäude wie folgt: „Der Niedrigstenergiegebäude beschreibt ein Gebäude, das eine sehr hohe, nach Anhang I bestimmte Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen – einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird – gedeckt werden.“ Die Definition und die Anforderungen werden dabei allerdings nicht näher quantifiziert.

Das GEG liefert hierzu die Anforderung (§ 15 Wohngebäude und § 18 Nichtwohngebäude), dass ein Niedrigstenergiegebäude den Jahres-Primärenergiebedarf das 0,75-fache eines Referenzgebäudes (definiert als ein Gebäude mit gleicher Geometrie, Nettogrundfläche, Ausrichtung, Nutzung und der technischen Referenzausführung gemäß Anlage 1 bzw. 2) aufweist. Hinsichtlich des baulichen Wärmeschutzes werden Mindestanforderungen an die Qualität der thermischen Gebäudehülle gemäß § 16 und 19 formuliert. Grundsätzlich definiert das GEG den eigenen Zweck und das Ziel gemäß § 1 Satz 1 als „[...] möglichst sparsamer Einsatz von Energie [...], einschließlich einer zunehmenden Nutzung erneuerbarer Energien zur Erzeugung von Wärme, Kälte und Strom für den Gebäudebetrieb.“ Des Weiteren formuliert § 2 Satz 2 das Ziel zur „[...] Schonung fossiler Ressourcen [...]“ sowie eine weitere Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien [...].“

Gemäß den beschriebenen Prinzipien zu ökologisch positiven Gebäuden (siehe Kapitel 4.4 auf Seite 28) sind im GEG lediglich Maßnahmen hinsichtlich des Handlungsfelds Energie erkennbar. Im Vordergrund steht hierbei maßgeblich die Reduktion des Energiebedarfs und die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien. Ein kompletter Umstieg auf erneuerbare Energien wird nicht forciert. Des Weiteren werden die Komponenten der Baukonstruktion (BK) und der Technischen Gebäudeausrüstung in Bezug auf die grauen Energien und Emissionen vernachlässigt.

5.1.6 Zertifizierungen

In Bezug auf ökologische, soziale und ökonomische Aspekte schneiden zertifizierte Gebäude im Vergleich zu konventionellen Gebäuden grundsätzlich besser ab [137]. Dies geschieht dadurch, dass in Zertifizierungssystemen in der Regel mehr Handlungsfelder vereint und die Synergieeffekte untereinander herausgearbeitet werden. Auf deutscher Ebene stellt das Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) die bedeutendste Zertifizierung dar [138]. Die DGNB trägt seit der Gründung 2007 stetig zur Verbreitung und Realisierung von nachhaltigen Gebäuden bei. In einem aktuellen Bericht der DGNB zeigt sich, dass bis zum Jahr 2021 7.200 zertifizierte Projekte umgesetzt wurden [139]. Inwiefern Maßnahmen zum positiven ökologischen Bauen (siehe Kapitel 4.4 auf Seite 28) bereits in Zertifizierungen berücksichtigt sind, ist aufbauend auf der systematischen Analyse verschiedener

Zertifizierungssysteme von Jensen et al. [140] dargestellt. In der Studie wurden insgesamt 45 Zertifizierungssysteme identifiziert, wovon 10 genauer analysiert wurden (siehe Tabelle 5.5). Da sich der Rahmen dieser Arbeit auf den deutschen Gebäudesektor fokussiert, wurden von den 10 Zertifizierungssystemen zwei Systeme ausgeklammert, welche sich spezifisch auf den dänischen Gebäudesektor beziehen. Als direkter Vergleich zu den baurechtlichen Mindestanforderungen ist zudem das GEG aufgeführt. In Bezug auf die Maßnahmen zum positiven ökologischen Bauen werden folgende Zertifizierungssysteme analysiert:

- Active House (International Active House Alliance) [141]
- Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology (BREEAM) [142]
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) [143]
- Green Star (Green Building Council Australia) [144]
- Haute Qualité Environnementale (HQE) [145]
- LEED [146]
- Living Building Challenge (LBC) [147]
- WELL (International Well Building Institute) [95]

Tabelle 5.5 Qualitative Bewertung von Zertifizierungssystemen inwiefern Prinzipien zum positiven ökologischen Bauen erkennbar sind (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [140])

System	Energie	Ressourcen	Wasser	Gesundheit	Emissionen	Biodiversität
GEG	o	-	-	-	-	-
Active House	o	+	o	o	o	+
BREEAM	o	o	o	o	o	+
DGNB	o	o	o	+	o	+
Green Star	o	o	o	o	o	+
HQE	o	o	o	o	o	+
LBC	+	+	+	+	+	+
LEED	o	o	o	+	o	o
WELL	-	-	-	+	-	-

+ Umfassend berücksichtigt, o Partiiell berücksichtigt, - Nicht berücksichtigt

5.2 Forschungsarbeiten im Themenfeld

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung hinsichtlich der Lebenszyklusanalyse (LCA) von Gebäuden, mit besonderem Fokus auf die Darstellung der Wirkungen von Emissionen auf Ökosysteme dargestellt. Die LCA stellt eine etablierte Methode zur Ermittlung der Umweltwirkungen von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus dar.

Ziel dieses Kapitels ist es, einen grundlegenden Überblick über bestehende Bewertungsmethoden zu vermitteln. Darauf aufbauend werden die identifizierten Bewertungsmethoden hinsichtlich des methodischen Vorgehens analysiert. Zudem wird dargestellt, ob diese Methoden für die Anwendung auf Gebäude und zur Einordnung von Wirkungen von Emissionen auf Ökosysteme geeignet sind. Dieser Überblick dient als Grundlage für die Formulierung der Forschungsfragen und zur Aufstellung der Forschungshypothese.

Die Ökobilanzierung eignet sich als grundsätzliches Werkzeug, um richtungweisende Informationen und Erkenntnisse über Gebäude zu erhalten und um die einhergehenden Umweltwirkungen zu quantifizieren und zu optimieren. In ihrem derzeitigen Zustand weist die Ökobilanz allerdings noch einige ungelöste Probleme auf, wie Reap et al. in einer Studie weitreichend darstellen [148]. Die Autor:innen untersuchen im ersten Schritt den Bereich des Impact Assessment, also der wirkungsbezogenen Bewertung. Darauf aufbauend wird auf die Interpretation von Ergebnissen und im Abschluss auf die Datenverfügbarkeit und -qualität eingegangen. Die Autor:innen identifizieren dabei insgesamt 15 verschiedene Herausforderungen, wobei für diese Arbeit die folgenden Themenschwerpunkte von wesentlicher Bedeutung sind:

- Definition der Systemgrenze
- Berücksichtigung untergeordneter Wirkungskategorien (z. B. Versauerungspotenzial (AP))
- Berücksichtigung der lokalen Umwelt (z. B. Wirkung auf Ökosysteme)
- Gewichtung und Bewertung der Wirkungsindikatoren (z. B. werden in Zertifizierungen Wirkungsindikatoren unterschiedlich stark gewichtet)
- Unsicherheit im Entscheidungsprozess
- Datenverfügbarkeit und -qualität

Für die Durchführung von LCAs sind die Definition der funktionellen Einheit, der betrachteten Systemgrenze(n) und die Gewichtung der Wirkungskategorien von großer Bedeutung. Diese drei Aspekte sind normativ noch nicht geregelt, was dazu führt, dass Ökobilanzen unterschiedliche Ergebnisse aufweisen können. Für die Durchführung und die Ergebnisinterpretation ist es daher wichtig, diese deutlich hervorzuheben und zu beschreiben, um so die notwendige Transparenz in Bezug auf die Ergebnisse herzustellen. In Bezug auf die wirkungsbezogene Bewertung konstatieren Reap et al., dass eine End-Point Bewertung (z. B. Flächenbedarf oder Einfluss auf die Biodiversität) einfacher zu interpretieren ist, als eine Mid-Point Bewertung (z. B. Globales Erwärmungspotenzial in kg CO₂-Äq.). Dies liegt daran, dass sich die Mid-Point Bewertung nicht direkt auf ein Schutzgut bezieht und lediglich Zahlenwerte liefert. Dies kann letztlich dazu führen, dass Wirkungskategorien im Rahmen der Bewertung nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren heben Reap et al. hervor, dass eine Berücksichtigung der lokalen Umwelt in Bezug auf die Bewertung wichtig ist. Damit kann die LCA gezielt für die lokale Entwicklung und Steigerung der Nachhaltigkeit genutzt werden. Abschließend heben sie hervor, dass die LCA methodisch weiterentwickelt werden muss, um für definierte Nachhaltigkeitsziele spezifischere Ergebnisse entwickeln zu können. Insbesondere auf politischer

Ebene kann dies für die Entscheidungsfindung von Bedeutung sein [149]. In Bezug auf das Thema dieser Arbeit lässt sich ein notwendiger Forschungsbedarf hinsichtlich der wirkungsorientierten Bewertung unter Einbeziehung der lokalen Umwelt identifizieren.

In einer ausführlichen Studie untersuchte Hofbauer, welche Bewertungsmethoden es aktuell gibt, um die Wirkung von Gebäuden auf Ökosysteme darzustellen [150]. Vor dem Hintergrund der Ressourcenknappheit und der Klimaerwärmung identifiziert sie im Rahmen einer ausführlichen Literaturrecherche Methoden zur Bewertung der Wirkung auf Ökosysteme und untersucht, ob diese mithilfe von LCA auf Gebäudeebene anwendbar sind. Im Rahmen ihrer Arbeit untersuchte sie folgende Bewertungsmethoden:

- Ökologischer Fußabdruck
- CO₂-Fußabdruck
- Wasserfußabdruck
- Biotopwertverfahren
- Menschliche angeeignete Nettoprimärproduktion (en: Human Appropriation of Net Primary Production) (HANPP)
- Nachhaltigkeits-Prozess-Index (en: Sustainability Process Index) (SPI)
- Umweltgewichteter Materialverbrauch (en: Environmental Weighted Material Consumption) (EMC)
- Methode der ökologischen Knappheit
- Indikator echten Fortschritts (en: Genuine Progress Indicator) (GPI)
- Nationaler Wohlfahrtsindex
- Index der Umweltleistungsfähigkeit (en: Environmental Performance Index) (EPI)

Unter Berücksichtigung der LCA und den Wirkungskategorien identifiziert Hofbauer, dass folgende Methoden auf Gebäudeebene anwendbar sind:

- Ökologischer Fußabdruck
- Nachhaltigkeits-Prozess-Index
- Methode der ökologischen Knappheit

Unter Berücksichtigung von Gebäudeökobilanzen konstatiert Hofbauer, dass der ökologische Fußabdruck [151] (Indikator zur Quantifizierung der Fläche, die ein Mensch benötigt, um seinen Bedarf an Ressourcen zu decken), der Sustainable Process Index (ein Maß für die Landfläche, die durch ökonomische Prozesse des Menschen verwendet wird, in Bezug zur verfügbaren Fläche) [152] und die Methode der ökologischen Knappheit (Methode zur Bewertung von Umweltwirkungen und den länderspezifischen Emissionszielen) [153] auf Gebäudeebene anwendbar sind. Hofbauer merkt allerdings an, dass die identifizierten Methoden nicht explizit für Gebäude entwickelt wurden und somit im Rahmen ihrer Anwendung viele Vereinfachungen und Annahmen notwendig sind, was zu einer Unschärfe der berechneten Ergebnisse führt. Als geeignetste Bewertungsmethode stellt Hofbauer den ökologischen Fußabdruck heraus, wobei angemerkt wird, dass für Gebäude nur die Siedlungsfläche, das *Energie- oder CO₂-Land* (notwendige Fläche zur Bindung von CO₂-Emissionen) und die *Waldfläche* (benötigte Waldfläche zur Bereitstellung von Holzprodukten) relevant sind. Weitere Flächen wie Fischgründe und Weide- und Ackerland sind auf Gebäudeebene nicht

relevant. Des Weiteren bezieht sich der ökologische Fußabdruck auf einen globalen durchschnittlichen Hektar; somit ist ein lokaler Bezug auf die ökologischen Eigenheiten der Umgebung nur schwer möglich. Hinsichtlich des SPI und der Methode der ökologischen Knappheit schreibt Hofbauer, dass zur Berechnung viele Annahmen und Vereinfachungen vorgenommen werden müssen. Dies liegt maßgeblich an der fehlenden und intransparenten Literatur (fehlende Quellen zu den verwendeten Kennwerten), um die Berechnungsschritte nicht vollständig nachvollzogen werden können. Inwiefern der ökologische Fußabdruck für Gebäude angewendet werden kann, zeigen folgende Studien [150, 154–159].

In der Studie von Bastianoni et al. [154] wurde der ökologische Fußabdruck für zwei verschiedene Wohngebäude mit der gleichen Grundfläche (jeweils 160 m²) untersucht. Dabei handelt es sich um ein zweigeschossiges Einfamilienhaus sowie um ein viergeschossiges Mehrfamilienhaus. Beide Gebäude bestehen aus einer Stahlbetonkonstruktion mit Hochlochziegel, einer Wärmedämmung aus Kork und aus Aluminiumfenstern. Die Autor:innen betonen dabei, dass die Berücksichtigung des indirekten ökologischen Fußabdrucks durch Flächen zur CO₂ Absorption einen essenziellen Aspekt im Bauwesen darstellt.

In der Studie wurden mittels einer LCA zunächst die CO₂-Emissionen der Baukonstruktion (BK) berechnet. Der jährliche Energiebedarf für die Nutzungsphase wurde dabei pauschal mit 5 % der grauen Energie der BK angenommen. Zur Ermittlung des ökologischen Fußabdrucks nach Wackernagel wurde ein CO₂-Absorptionsfaktor von 0,095 kg/m² angenommen. Für die zwei Gebäude ermitteln die Autor:innen einen ökologischen Fußabdruck in Globalen Hektar (gha) von 0,63 globale Hektar (gha/Jahr) (Einfamilienhaus) und 0,95 gha/Jahr (Mehrfamilienhaus) pro Person. Bezogen auf die jeweiligen Grundflächen ist die benötigte Fläche zur Bindung der CO₂-Emissionen um den Faktor 39 (Einfamilienhaus) und 59 (Mehrfamilienhaus) größer als die Gebäudegrundfläche.

Bezogen auf die Anzahl der Bewohnenden resultiert ein ökologischer Fußabdruck von 0,12 Globale Hektar (gha)/Jahr (Einfamilienhaus) und 0,09 gha/Jahr (Mehrfamilienhaus). Überdies weist die Studie in Bezug auf die LCA Schwächen in der Transparenz auf. So wurde nicht beschrieben, welche Datenbank zur Berechnung der Ökobilanz verwendet wurde. Des Weiteren wurde die Nutzungsphase nur mit einem pauschalen Faktor berücksichtigt. Außerdem wurde nicht beschrieben, welche Austauschzyklen in der Baukonstruktion angesetzt wurden.

Solís-Guzmán et al. [155] wendeten den ökologischen Fußabdruck auf die BK von Wohngebäuden in Andalusien (Spanien) an. Untersucht wurde die Herstellungsphase für ein typisches Wohngebäude mit vier Stockwerken und insgesamt 107 Wohneinheiten und einer gesamten Nutzfläche von 10.243 m². In die Berechnung inkludieren sie den Energiebedarf zur Errichtung der Baukonstruktion, Wasserbedarf, Nahrungsbedarf der Arbeitenden, Transport, Baumaterialien, die gebundene graue Energie, Abfall und das bebaute Land. Das Ergebnis der Studie zeigt für das gesamte Wohngebäude einen jährlichen ökologischen Fußabdruck von ca. 3.939 gha/Jahr, wobei die Fläche für die Absorption der CO₂-Emissionen mit ca. 82 % maßgeblich ist. Den größten Anteil daran macht wiederum die Baukonstruktion mit ca. 73 % aus. Bezogen auf die Anzahl der Bewohnenden resultiert ein ökologischer Fußabdruck von rund 14 gha/Jahr. In Bezug auf die Studie von Bastioni et al. [154] entspricht das einer Steigerung um den Faktor 113. Aufgrund der fehlenden Transparenz beider Studien ist ein direkter Vergleich und eine gegenseitige Validierung dieser Ergebnisse nicht möglich. Die Unterscheidung um den Faktor 113 zeigt, dass für die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit von Ergebnissen im Rahmen von LCA die Angabe der Systemgrenzen und Randbedingungen essenziell sind.

Liu et al. [156] untersuchen in Ihrer Studie den ökologischen Fußabdruck bezogen auf ein ländliches Haus und einen mehrgeschossigen Wohnbau. In der Berechnung wird der gesamte Lebenszyklus der Gebäude (Herstellung, Nutzung und Rückbau) berücksichtigt. Für die Baukonstruktion werden für das Landhaus keine Angaben gemacht, das mehrgeschossige Wohngebäude besteht vorwiegend aus Ziegeln. Die Ergebnisse zeigen einen ökologischen Fußabdruck für das mehrgeschossige Wohngebäude von 2,15 gha/Jahr und für das Landhaus von 0,19 gha/Jahr.

Teng und Wu [157] verwendeten die Methode zur Berechnung des ökologischen Fußabdrucks zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit einer Ausstellungshalle in der Provinz Hubei, China an. Sie berechneten den ökologischen Fußabdruck für die Ausstellungshalle über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. Das Besondere an dieser Studie ist, dass die Autor:innen den ermittelten ökologischen Fußabdruck in Bezug auf die zur Verfügung stehenden pro Kopf Biokapazität in der Provinz Hubei und auf gesamt China bezogen haben. Dabei zeigt sich, dass in Bezug auf die Biokapazität der Provinz Hubei sich ein ökologischer Fußabdruck von 0,96 ha/Jahr ergibt. Bezogen auf die globalen Biokapazitäten, bedeutet dies, dass Fläche zur Sicherstellung des Ressourcenbedarfs und zur Bindung der CO₂-Emissionen benötigt wird. Bezogen auf die Biokapazitäten von China ergibt sich ein ökologischer Fußabdruck von -0,29 ha/Jahr. Dies bedeutet wiederum, dass die zur Verfügung stehenden ökologischen Kapazitäten unterschritten werden. Die Autor:innen konstatieren daher, dass das Projekt, bezogen auf gesamt China, nachhaltig sei.

Wie der Ausdruck „Fußabdruck“ zudem verwendet wird, zeigen weitere Studien wie Lim et al. [158] und Airaksinen & Matilainen [159]. In beiden Studien wird der CO₂-Fußabdruck berechnet. Dabei ist hervorzuheben, dass die ermittelten CO₂-Emissionen in keinerlei Relation zu einer Fläche dargestellt werden. In beiden Studien werden lediglich die CO₂-Emissionen berechnet und dargestellt.

Anhand der Ergebnisse aus der Analyse der hier beschriebenen Studien zeigt sich, dass die jeweiligen Ergebnisse der Berechnungen zum ökologischen Fußabdruck unterschiedlich ausfallen (siehe Tabelle 5.6). Zum Stand des Wissens kann festgestellt werden, dass die Methode zur Berechnung des ökologischen Fußabdrucks in seiner jetzigen Form nicht ausreichend ist, um Wirkungen von Gebäuden auf Ökosysteme basierend auf Ökobilanzen darzustellen. Zudem ist es von großer Bedeutung, die Auswirkungen auf Ökosysteme und deren Ökosystemleistungen herzustellen und dafür geeignete Bewertungsmethoden zu entwickeln [160]. In Ökobilanzen wird die Wirkung auf Ökosysteme jedoch unzureichend berücksichtigt [161–163]. Allerdings wird der Bedarf und die Nachfrage nach geeigneten Bewertungsmethoden, insbesondere als Entscheidungshilfe, steigen [164]. Ein wesentlicher zu berücksichtigender Aspekt stellt der Bezug zu den lokalen Ökosystemen dar. Ökobilanzen werden zwar zur Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten verwendet, allerdings fehlt eine ökosystem-spezifische Wirkungsabschätzung [163].

Tabelle 5.6 Vergleich von Studien hinsichtlich der Berechnung des ökologischen Fußabdrucks auf Basis von Gebäude-Ökobilanzen

Quelle	Ökologischer Fußabdruck pro m ² Nutzfläche [gm ² /a ²]	ökologischer Fußabdruck pro Person [gha/a]
Bastianoni et al. [154]	39	0,12
	59	0,09
Solíz-Guzmán et al. [155]	3.845	13,63
Liu et al. [156]	4,08	0,01
	4,09	0,02
Teng & Wu [157]	6.326	0,96

In einer ausführlichen Studie von Rugani et al. [160] untersuchten die Autor:innen Ansätze zur Implementierung von Ökosystemleistungen in einer LCA. Untersucht wurden dabei 33 verschiedene wissenschaftliche Quellen und methodische Ansätze. Die Autor:innen kommen dabei zum Ergebnis, dass bestehende Modelle zur Charakterisierung von Auswirkungen auf Ökosystemleistungen nur einzelne Aspekte berücksichtigen. Dies führt dazu, dass die Zusammenhänge in der Ursache-Wirkungs-Kette nicht hinreichend gut abgebildet werden. Des Weiteren konstatieren die Autor:innen, dass vorgeschlagene Ansätze nicht in ausreichendem Maße beschrieben werden, um diese zuverlässig im Rahmen der Wirkungsabschätzung von LCAs zu implementieren. Idealerweise sollte die Bewertung der Ökosystemleistungen verschiedene Aspekte berücksichtigen, wie die Ökosystemstruktur und deren Funktion. Dabei muss beachtet werden, dass eine doppelte Erfassung für die Wirkungsabschätzung vermieden werden muss. Den letzten Aspekt, den die Autor:innen aufführen, ist die Herstellung eines räumlichen Kontextes zur Bewertung der Ökosystemleistungen.

In einer ausführlichen Literaturrecherche analysierten van der Wilde & Newell insgesamt 56.000 wissenschaftliche Quellen. Davon identifizierten sie 91 Studien, die auf eine sinnvolle Art und Weise Ökosystemdienstleistungen in die Lebenszyklusanalyse implementierten [165]. Basierend auf den analysierten Quellen konstatieren die Autor:innen den ökologischen Flächenbedarf als einen wertvollen und sinnvollen Bereich für die weitere Forschung. Als großen Vorteil geben sie dabei an, dass dabei mehrere Aspekte berücksichtigt werden können, z. B. lokale Eigenschaften, Ökosystemleistungen und Biodiversität. Des Weiteren betonen die Autor:innen die Bedeutung in der Zusammenarbeit zwischen Forschenden aus den Bereichen der LCA und der Ökologie, um so Synergieeffekte zu nutzen. Zusammenfassend zeigt sich, dass es zum aktuellen Zeitpunkt keine Bewertungsmethode für Lebenszyklusanalysen gibt, welche die ökologischen Belastungsgrenzen hinreichend genau berücksichtigt.

5.3 Kurzzusammenfassung

Ansätze zum positiven Bauen sind in der Bauleitplanung (ökologische Kompensation) und im Gebäudeenergiegesetz GEG (Verwendung erneuerbarer Energie) punktuell erkennbar. In der Gebäudeleitplanung sind alle nicht vermeidbaren Beeinträchtigungen und Schäden von Naturräumen zu kompensieren (um letztendlich positiv zu werden, müsste Überkompensiert werden). Im GEG wird darauf aufbauend ein Mindestanteil an erneuerbaren Energien gefordert. Es zeigt sich in beiden Fällen, dass die Aspekte des positiven Bauens

nicht voll umfassend berücksichtigt werden. In der Gebäudeplanung werden die Handlungsfelder Material, Wasser, Gesundheit, Emissionen, Umgebung und Biodiversität vernachlässigt. Aus dem Stand der Technik sind Defizite hinsichtlich der Berücksichtigung von Aspekten zum positiven Bauen erkennbar. Aufbauend darauf zeigt der Stand der Forschung, dass bereits einige Methoden und wissenschaftliche Studien zur Ermittlung und Bewertung von Wirkungen auf Ökosysteme existieren. Allerdings weisen die identifizierten Methoden Defizite bezüglich der limitierten Auswahl der Wirkungsindikatoren und der Anwendbarkeit für Gebäude auf Basis von Lebenszyklusanalysen (LCA) auf. Es ist daher erforderlich, eine Methode zu entwickeln, mithilfe derer auf Basis von LCAs ein Bezug zwischen Gebäuden und der Wirkung auf Ökosystemen hergestellt werden kann.

6 Beschreibung des methodischen Vorgehens

Dieses Kapitel dient dazu, das methodische Vorgehen bei der Ermittlung und Optimierung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) zu beschreiben. Die entwickelte Methode basiert auf ausgewählten Mid-Point Indikatoren von Lebenszyklusanalysen (LCA). Es werden dabei die Indikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Eutrophierungspotenzial (EP) und Versauerungspotenzial (AP) berücksichtigt. Die Ergebnisse der LCA werden systematisch mit ökosystem-spezifischen Kennwerten mathematisch erweitert. Für die ökosystem-spezifischen Kennwerte werden zwei grundlegende biologische Konzepte verwendet: die Kohlenstoffdioxid-Assimilation und das Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen (CL). Durch diese Kombination der beiden Berechnungsmethoden ist es möglich, einen emissionsbezogenen ökologischen Flächenbedarf zu ermitteln. Des Weiteren stellt diese systematische Kombination eine Verbindung zwischen zwei unterschiedlichen Bewertungsmethoden der Fachbereiche *Ecological Modelling* und *Building Performance Modelling* dar. Abschließend stellt der entwickelte ELD einen End-Point Indikator mit dem Schutzziel des Erhalts von Ökosystemen dar.

In der Literatur werden die Verwendung von Mid-Point und End-Point Indikatoren diskutiert und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Indikatoren beschrieben. Bei Mid-Point Indikatoren werden verschiedene Emissionen und deren Umweltwirkungen als einzelne Wirkungsindikatoren, wie beispielsweise Treibhauspotenzial (GWP) dargestellt. End-Point Indikatoren stellen mehrere Umweltwirkungen, wie beispielsweise das Treibhauspotenzial und das Versauerungspotenzial in einem Indikator und in einem konkreten Kontext, wie beispielsweise den ökologischen Flächenbedarf dar. Die Autor:innen Bare et al. stellen fest, dass zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung grundsätzlich sowohl Mid-Point als auch End-Point Indikatoren verwendet werden sollten. Die Vorteile hierbei sind, dass Mid-Point Indikatoren eine höhere Sicherheit aufweisen, während End-Point Indikatoren grundsätzlich eine höhere Bedeutung beigemessen wird. Besonders in Bezug auf den Umweltschutz und die verständlichere Darstellung von LCA-Ergebnissen begründet dies die Notwendigkeit nach einem geeigneten End-Point Indikator. [166]

Die Grundlagen zur LCA sind in Kapitel 6.2 beschrieben. Darauf aufbauend werden in Kapitel 6.3 die verwendeten ökologischen Konzepte und die Ermittlung der ökosystem-spezifischen Kennwerte erläutert. Nachdem beide grundlegenden Berechnungsmethoden beschrieben sind, beschäftigt sich das Kapitel 6.4 mit dem mathematischen Sachverhalt zur Kombination der Berechnungsmethoden und zur Ermittlung des ELD. Der ELD dient für die weiteren Optimierungen als Zielfunktion. Abschließend wird in Kapitel 6.5 die lebenszyklusbasierte parametrische Optimierung beschrieben. Es wird darauf eingegangen, wie der zuvor beschriebene mathematische Sachverhalt in ein Gebäudesimulationsprogramm implementiert werden kann. Anschließend werden die parametrische Optimierung und die verwendeten Optimierungsverfahren beschrieben.

6.1 Übersicht

Die Berechnung und Optimierung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) auf Basis von Lebenszyklusanalysen (LCA) und thermischen Gebäudesimulationen lässt sich in vier methodische Schritte aufteilen. Schematisch sind diese vier Schritte in Abbildung 6.1 auf Seite 53 dargestellt. Als Grundlage hierfür dient ein bereits umgesetztes Gebäude als Fallbeispiel. Für die Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs des Gebäudes werden grundlegende Informationen benötigt. Hierunter zählen Angaben zur Baukonstruktion (BK) (Art und Menge der verwendeten Materialien), zum Energiesystem (Heizung, Kühlung, Lüftung, Warmwasser und Beleuchtung), zum Standort des Gebäudes und zum Klima.

1. **Lebenszyklusanalyse (LCA):** Im ersten Schritt erfolgt die Ermittlung der Umweltwirkungen auf Gebäudeebene mittels LCA. Die LCA beinhaltet die Baukonstruktion (BK), Technische Gebäudeausrüstung (TGA) und den Energiebedarf in der Nutzungsphase. Es werden die Lebenszyklusphasen Herstellung, Austausch, Nutzung und Entsorgung betrachtet. Die Beschreibung der normativen Berechnung, die verwendete Datenbank und den verwendeten Umweltindikatoren sind in Kapitel 6.2 beschrieben.
2. **Ökosystem-spezifische Kennwerte:** Um den ELD auf Basis der LCA zu ermitteln, werden ökosystem-spezifische Kennwerte (Fläche, Ökologische Belastungsgrenze (CL) und natürliche Regenerationsfähigkeit) der vorhandenen Ökosysteme (Wald, Grünland, Heiden, Moore, Sümpfe und Gewässer) in Deutschland benötigt. Im Kapitel 6.3 auf Seite 63 werden die Konzepte der ökologischen Belastungsgrenzen und der natürlichen Regenerationsfähigkeiten von Ökosystemen erläutert. In Ergänzung zu Schritt 1 dient dieser Schritt als Grundlage zur Entwicklung des End-Point LCA-Indikators ELD.
3. **End-Point LCA-Indikator:** In Schritt 3 werden die Berechnungen und Daten aus Schritt 1 und 2 gekoppelt und der ELD ermittelt. Da die Daten aus der LCA und die ökosystem-spezifischen Kennwerte nur teilweise miteinander kompatibel sind, müssen Umrechnungen anhand von Charakterisierungsfaktoren vorgenommen werden. Dies ermöglicht die Kopplung der beiden Schritte und der Berechnung des ELD.
4. **Parametrische Optimierung:** Der letzte Schritt stellt die lebenszyklusbasierte, parametrische Optimierung dar (siehe Kapitel 6.5 auf Seite 80). Hierfür wird mit Hilfe der Simulationssoftware IDA ICE [167] von dem zu untersuchenden Fallbeispiel ein Gebäude- und Simulationsmodell erstellt. Anschließend werden die zuvor beschriebenen Schritte 1, 2 und 3 implementiert. Die Implementierung erfolgt mittels grafischer Programmierung (en: graphical scripting). Die parametrische Optimierung erfolgt anhand von ausgewählten Optimierungsverfahren unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. Das Ergebnis aus Schritt 4 sind optimierte Gebäudeparameter, die in der Gebäudeplanung verwendet werden können.

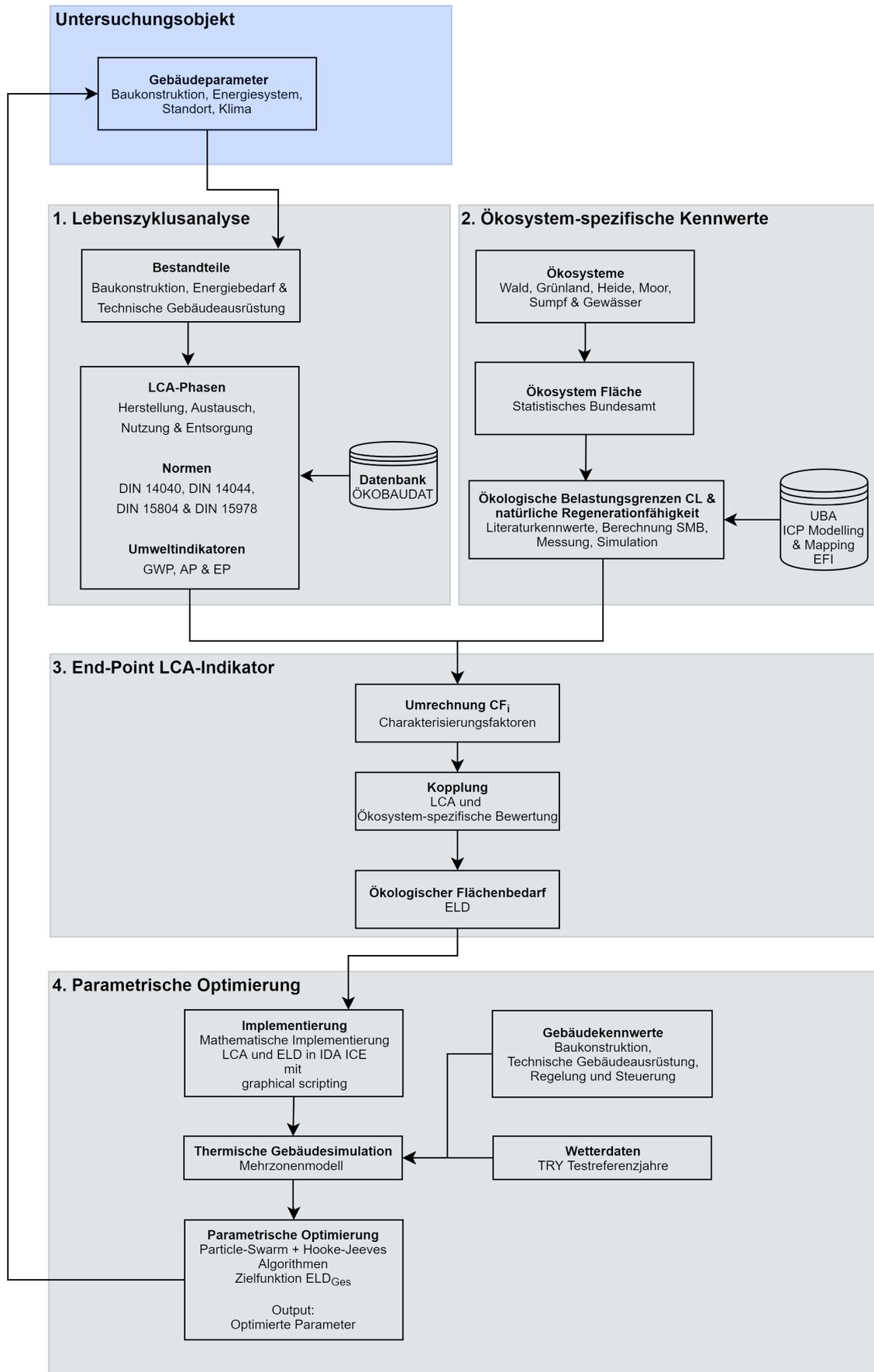


Abbildung 6.1 Übersicht über die methodischen Schritte (eigene Darstellung)

6.2 Lebenszyklusanalyse (LCA)

6.2.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Ermittlung der Umweltwirkungen von Gebäuden beschrieben. Zur Ermittlung der potenziellen Umweltwirkungen dient im Rahmen dieser Arbeit die Lebenszyklusanalyse (LCA). Im Rahmen der Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) stellt die LCA den ersten notwendigen Schritt dar (siehe Abbildung 6.2). Diese dient grundsätzlich der Quantifizierung des Ressourceneinsatzes und potenziellen Umweltwirkungen von Produkten oder Dienstleistungen über deren Lebenszyklus. Die Aussagekraft der Berechnungen und Ergebnisse ist maßgeblich von den angesetzten Randbedingungen abhängig (z. B. definierte Systemgrenzen, verwendete Datenbank) und Vereinfachungen (z. B. Bestandteile der LCA). Des Weiteren ist die LCA dahin gehend limitiert, dass keine Aussagen darüber getroffen werden können, wann (zeitlich) und/oder wo (örtlich) die Umweltwirkungen auftreten. Diese Unschärfe muss bei der Durchführung und Analyse einer LCA berücksichtigt werden. Geeignet ist die LCA daher am besten zum Aufzeigen von Tendenzen, Vergleich von verschiedenen Produkten (z. B. Vergleich von zwei verschiedenen Wärmedämmstoffen) und Unterstützung von Entscheidungen im Planungsprozess. Für Gebäude gibt es die LCA auf verschiedenen Ebenen:

- Materialebene (z. B. Vergleich von Wärmedämmstoffen)
- Bauteilebene (z. B. Vergleich von verschiedenen Konstruktionsarten)
- Prozessebene (z. B. Vergleich von Energiesystemen)
- Gebäudeebene

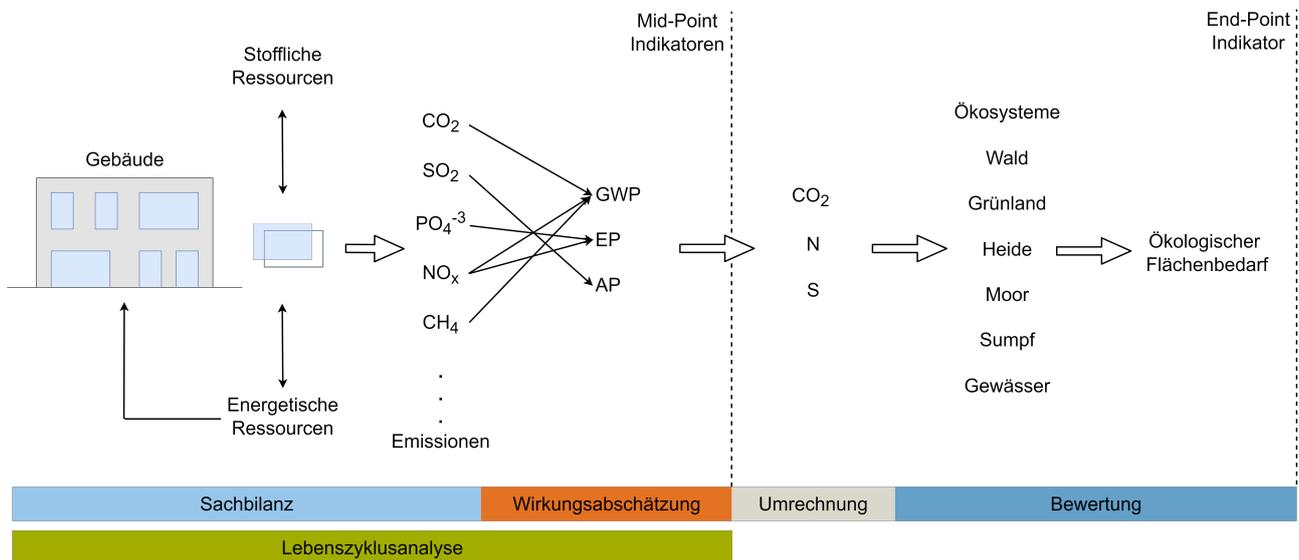


Abbildung 6.2 Darstellung der klassischen Lebenszyklusanalyse (LCA) bestehend aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung sowie der im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten methodischen Erweiterung um den ökologischen Flächenbedarf (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [168])

Die Grundlagen, Randbedingungen und der methodische Rahmen sind in den Normen DIN EN ISO 14040:2021-05 [5] und DIN EN ISO 14044:2021-05 [13] definiert. Die DIN EN ISO 14040:2021-05 thematisiert dabei die Grundsätze und Rahmenbedingungen, während sich die DIN EN ISO 14044:2021-05 mit den Anforderungen und dem methodischen Rahmen beschäftigt. In Ergänzung dazu beschreibt die

DIN EN 15978:2012-10 [4] die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden und liefert eine Berechnungsmethode zur Durchführung von LCA auf Gebäudeebene. Darüber hinaus liefert die Norm DIN EN 15978:2012-10 die Grundlage für die einzelnen Lebenszyklusphasen von Gebäuden (siehe Abbildung 6.3).

Der eigentliche Prozess einer LCA gliedert sich in die vier folgenden Phasen:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens erfolgt in der ersten Phase und ist von großer Bedeutung, da die Ergebnisse der LCA große Unschärfen aufweisen können. Es ist daher zwingend notwendig, die funktionelle Einheit, Wirkungsindikatoren, Systemgrenzen und den Detaillierungsgrad vor der Berechnung zu definieren. Die funktionelle Einheit definiert die Bezugsgröße, auf die sich die LCA bezieht, bspw. m³ an Material oder ein vollständiges Gebäude. Zu Beginn müssen außerdem die Wirkungsindikatoren und die Systemgrenzen (zeitlich und räumlich) definiert werden. Zu den zeitlichen Systemgrenzen zählt die Festlegung des Betrachtungszeitraumes (z. B. Lebensdauer des Gebäudes), während zu den räumlichen Systemgrenzen die Bestandteile der Bilanzierung (z. B. welche Materialien bilanziert werden und welche nicht) zählen.

Die festgelegten Systemgrenzen und der Detaillierungsgrad haben einen direkten Einfluss auf die Sachbilanz (zweite Phase). In der Sachbilanz werden alle zu untersuchenden In- und Outputdaten in Bezug auf das zu untersuchende Produkt ermittelt. Zu den Inputdaten zählen beispielsweise verwendete Ressourcen oder Energie. Zu den Outputdaten zählen Emissionen in die Umgebung.

In der dritten Phase, der Wirkungsabschätzung, werden die Umweltwirkungen für alle ermittelten In- und Outputdaten anhand der festgelegten Wirkungskategorien ermittelt und bewertet. Als Grundlage dienen hierfür Ökobilanz-Datenbanken wie z. B. die ÖKOBAUDAT des Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) [10]. Die ÖKOBAUDAT ist eine gebäudespezifische Datenbank, welche verschiedenste Datensätze zu gängigen Bauprodukten und Bauprozessen beinhaltet.

Nachdem die Wirkungsabschätzung durchgeführt wurde, müssen die Ergebnisse in der vierten Phase ausgewertet und in den Gesamtkontext und dem Ziel der LCA eingeordnet werden. Die Auswertung erfolgt dabei anhand der zuvor definierten funktionellen Einheit und Wirkungsindikatoren.

Definierte Systemgrenzen

In Bezug auf die zeitliche Systemgrenze wird im Rahmen der Arbeit ein Betrachtungszeitraum des Gebäudes von 50 Jahren definiert. Die angesetzten 50 Jahre sind ein gängiger Wert, der auch in der Zertifizierung gemäß DGNB angesetzt wird [143]. Als funktionelle Einheit wird das Gebäude definiert. Hinsichtlich der räumlichen Systemgrenzen werden daher folgende Komponenten der Baukonstruktion (BK) und Technische Gebäudeausrüstung (TGA) (sofern im Gebäudekonzept enthalten) mit in die Bilanzierung aufgenommen:

- Gründung
- Außenwände

- Fenster
- Innenwände
- Decken
- Dächer
- Konstruktive Einbauten
- Hauptkomponenten des Wärme- und Kälteerzeugers
- Lüftungsanlage
- Übergabesysteme
- Photovoltaikanlage
- Solarthermieanlage

Folgende Punkte werden nicht mit bilanziert:

- Farben und Beschichtungen
- Möbel und Leuchten
- Geländer
- Fußbodenbeläge
- Elektrische Kabel
- Rohre (z. B. Regenwasserrohr)
- Komponenten der Außenanlagen

Betrachtete Lebenszyklusphasen

Die erste Phase, die Herstellungsphase (A1-3), beinhaltet den gesamten Herstellungsprozess von Materialien (siehe Abbildung 6.3 auf Seite 57). Dabei werden sowohl der Rohstoffabbau, der Transport als auch der reine Produktionsprozess von Materialien berücksichtigt. Darauf aufbauend beschäftigt sich die Errichtungsphase (A4-5) mit den Baustellenprozessen für die Errichtung des Gebäudes. Dabei werden der Transport von Materialien zur Baustelle und die Baustellenprozesse selbst (wie z. B. das Betreiben von Baumaschinen) berücksichtigt. In der Nutzungsphase (B1-7) werden die Nutzung von Materialien (B1), die Instandhaltung (B2), die Instandsetzung (B3), der Austausch (B4) und Modernisierung (B5), der Energieverbrauch des Gebäudebetriebs (B6) und der Wasserverbrauch (B7) bilanziert. Die Entsorgungsphase (C1-4) beinhaltet die Umweltwirkungen, die nach dem Nutzungsende des Gebäudes auftreten. Potenziale, die sich aus der Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling von Ressourcen ergeben, werden außerhalb der Systemgrenze in Modul D abgebildet und dienen als ergänzende Informationen.

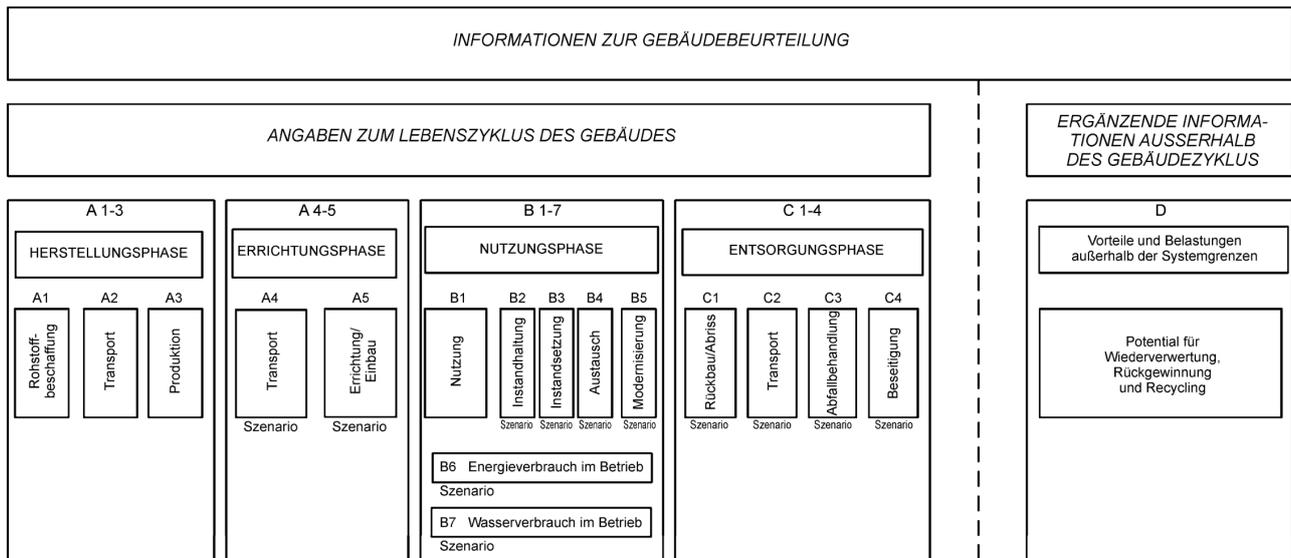


Abbildung 6.3 Einzelne Lebenszyklusphasen von Gebäuden (Quelle: [4])

Im Rahmen dieser Dissertation werden folgende Lebenszyklusphasen betrachtet:

- A1: Rohstoffbeschaffung
- A2: Transport
- A3: Produktion
- B4: Austausch
- B6: Energieverbrauch im Betrieb
- C3: Abfallbehandlung
- C4: Beseitigung

Verwendete Datenbank

Als Datengrundlage dient im Rahmen dieser Dissertation die ÖKOBAUDAT 2021-II des BMI [10]. Die Intention des BMI ist, mit dieser Datenbank eine einheitliche Datenbasis speziell für die Ökobilanzierung für Gebäude bereitzustellen. Die ÖKOBAUDAT beinhaltet in der aktuellsten Version 2021-II rund 1.400 Datensätze zu gängigen Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen. Bei den Datensätzen handelt es sich um drei verschiedene Arten von Datensätzen: generische, durchschnitts- und spezifische Datensätze. Die generischen Datensätze bilden die durchschnittliche länderspezifische Situation in Deutschland ab, Durchschnittsdatsätze hingegen repräsentieren Mittelwerte für ähnliche Produktgruppen innerhalb einer herstellenden Firma (z. B. verschiedene Typen von Holzfaserdämmungen eines Herstellers) und spezifische Datensätze bilden die Situation eines spezifischen Produkts und herstellender Firma ab (z. B. Holzfaserdämmstoff Thermofibre der Firma GUTEX). Um einheitliche Datensätzen zu gewährleisten, sind alle enthaltenen Datensätze konform zur DIN EN 15804 [6]. Die DIN EN 15804:2012 behandelt für die Umweltproduktdeklarationen (en: Environmental Product Declarations EPD) die Grundregeln zum Aufbau und den Ergebnissen in den EPDs für die Produktkategorie Bauprodukte. Die enthaltenen Datensätze sind in elf einzelne Kategorien unterteilt. Hierzu zählen:

1. Mineralische Baustoffe
2. Dämmstoffe
3. Holz
4. Metalle
5. Beschichtungen
6. Kunststoffe
7. Komponenten von Fenstern und Vorhangfassaden
8. Gebäudetechnik
9. Sonstige
10. Komposite
11. End of Life

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Datensätzen zu gewährleisten, sind in der ÖKOBAUDAT alle Datensätze nach demselben Schema aufgebaut. Aufgeteilt ist ein Datensatz in die vier Bereiche Prozess-Informationen, Modellierung und Validierung, administrative Informationen und Umweltindikatoren. Um einen Datensatz und den Prozess, welcher hinter der Erstellung des Datensatzes liegt, zu beschreiben, dienen folgende Angaben.

- Bezeichnung
- Referenzjahr
- Repräsentativität (geografisch, zeitlich und technisch)
- Eigentümer des Datensatzes
- Referenzfluss
- Materialeigenschaften
- Gültigkeit

Für die Auswahl eines geeigneten Datensatzes dient neben dem Referenzjahr insbesondere die Repräsentativität. Hierbei wird der Datensatz geografisch eingeordnet (bei der ÖKOBAUDAT in der Regel Deutschland), zeitlich (z. B. wann der Datensatz erstellt wurde und wie lang dieser noch seine Gültigkeit besitzt) und technisch, d. h. wofür das Material im Datensatz aus technischer Sicht geeignet ist. Des Weiteren beinhaltet ein Datensatz die Art des Datensatzes (generisch, Durchschnitt oder spezifisch), den Eigentümer, Referenzfluss und die Materialeigenschaften. In Bezug auf die Umweltindikatoren werden Angaben zu verschiedensten Wirkungskategorien (z. B. erneuerbarer Primärenergie in MJ oder globales Erwärmungspotential in kg CO₂-Äq.) für die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen gegeben. Ein grundsätzliches Problem besteht hierbei darin, dass Hersteller nur dazu verpflichtet sind, Angaben über Herstellungsphase (A1-3) zu liefern. Dies führt dazu, dass Datensätze insbesondere in den Lebenszyklusphasen der Errichtung (A4-5) und Entsorgung (C3-4) Datenlücken aufweisen. Schönauer et al. zeigen in einer Studie, dass für nur rund 21 bis 31 % der Datensätze in der ÖKOBAUDAT Daten in den Lebenszyklusphasen (C3-4) deklariert sind [169]. Das heißt, es müssen für die fehlenden Entsorgungsphasen Szenarien angenommen werden, um so eine vollständige LCA zu gewährleisten.

Betrachtete Wirkungsindikatoren

Im Folgenden werden alle Wirkungsindikatoren beschrieben, die zur Bewertung von Umweltwirkungen im Rahmen dieser Dissertation verwendet werden.

Für die Bewertung der globalen Erderwärmung dient der Wirkungsindikator **Treibhauspotenzial (GWP)**. Über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes fallen eine Vielzahl an Treibhausgasemissionen mit unterschiedlich starken Wirkungen an. Das GWP dient dabei dazu, alle anfallenden Treibhausgasemissionen auf einen normierten Wert darzustellen. Angegeben wird das GWP in Kilogramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalente [kg CO₂-Äq.]. Beispielsweise weist Methan (CH₄) einen um den Faktor 25 höheres Treibhauspotential als Kohlenstoffdioxid (CO₂) auf [170]. Das heißt, wenn im Lebenszyklus eines Gebäudes 1 kg Methan emittiert wird, dann resultiert dies in einem GWP von 25 kg CO₂-Äq.

Ein weiterer Wirkungsindikator ist das **Eutrophierungspotenzial (EP)**. Das Eutrophierungspotenzial (EP) ist ein Indikator zur Beschreibung der Anreicherung von Nährstoffen in terrestrischen und aquatischen Ökosystemen. Die Anreicherung von Nährstoffen führt in den Ökosystemen zu einem Zustandswechsel in einen nährstoffreicheren Zustand (eutroph). Dieser Zustand kann zu Verlusten an Biodiversität führen. Hervorgehoben wird dies beispielsweise durch ein gesteigertes Algenwachstum in Gewässern, was zu einer reduzierten Sauerstoffverfügbarkeit und dann zu einem Fischsterben führen kann. Angegeben wird das EP in Kilogramm Phosphat-Äquivalenten [kg PO₄⁻³-Äq.].

Ein weiterer wichtiger Wirkungsindikator in Bezug auf die Biodiversität stellt gemäß [19] das **Versauerungspotenzial (AP)** dar. Unter der Versauerung wird die Anreicherung von H⁺-Ionen verstanden. Die Anreicherung von H⁺ kann zur Auswaschung von Nährstoffen, zur Freisetzung von toxischen Kationen und letztlich zum Rückgang der Biodiversität (z. B. Wald- oder Fischsterben) führen. Angegeben wird das Versauerungspotenzial (AP) in Kilogramm Schwefeldioxid-Äquivalenten [kg SO₂-Äq.].

Nutzungsdauern von Bauteilen und Materialien

Als Grundlage zur Ermittlung der Austauschzyklen von Bauteilen und Materialien innerhalb des Betrachtungszeitraums dienen Angaben gemäß dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) [171]. Das BBSR liefert hierbei durchschnittliche Lebensdauern für die LCA im Rahmen der Zertifizierung nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Die Lebensdauern sind untergliedert in die Kostengruppe 300 nach DIN 276:2018 [172]. Diese beinhalten folgende Bauteile:

- Gründung
- Außenwände
- Innenwände
- Decken
- Dächer
- Konstruktive Einbauten

Die Lebensdauern von Komponenten der TGA (Kostengruppe 400) werden gemäß ÖKOBAUDAT berücksichtigt [10].

6.2.2 Ermittlung der Umweltwirkungen

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Grundlagen (siehe Kapitel 6.2.1), sind in diesem Kapitel die einzelnen Berechnungsschritte zur Ermittlung der Umweltwirkungen (UW) beschrieben. Es wird dabei getrennt auf die Baukonstruktion (BK), Energieverbrauch im Betrieb und die Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung eingegangen. Die gesamten Umweltwirkungen des Gebäudes setzen sich aus den einzelnen Kenngrößen für die Baukonstruktion (BK), Nutzungsphase (N) und Technische Gebäudeausrüstung (TGA) gemäß Formel 6.1 zusammen. Für die BK und Komponenten der TGA werden die Lebenszyklusphasen Herstellung (A1-3), Austausch (B4) und Entsorgung (C3-4) berechnet. Der Energieverbrauch in Betrieb bezieht sich auf die Nutzungsphase (B6).

$$UW_{Ges,w} = UW_{BK,w} + UW_{TGA,w} + UW_{N,w} \quad (6.1)$$

$UW_{Ges,w}$: Umweltwirkung Gesamt

$UW_{BK,w}$: Umweltwirkung der BK (A1-3), (B4) und (C3-4)

$UW_{N,w}$: Umweltwirkung der Nutzungsphase (B6)

$UW_{TGA,w}$: Umweltwirkung der TGA (A1-3), (B4) und (C3-4)

w : spezifischer Wirkungsindikator (GWP, AP oder EP)

Die jeweiligen Berechnungen zu den einzelnen Umweltwirkungen sind im Folgenden beschrieben.

Baukonstruktion (BK) und Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

Die einzelnen schematischen Schritte in der Ermittlung der Umweltwirkungen sind im Folgenden aufgelistet.

1. Identifikation und Definition der zu betrachtenden Baukonstruktion (BK) (inkl. der einzelnen Bauteilschichten und den verwendeten Materialien) und Komponenten der TGA
2. Massenermittlung zu den verbauten Komponenten
3. Identifikation und Definition von Austauschzyklen anhand der Nutzungsdauern der Komponenten (Bauteile, Materialien und Technische Gebäudeausrüstung)
4. Analyse und Identifikation von geeigneten Datensätzen zu den einzelnen Materialien aus der ÖKO-BAUDAT
5. Umrechnung des spezifischen Datensatzes auf die definierte funktionelle Einheit
6. Festlegung des zu untersuchenden Wirkungsindikators
7. Verrechnung des Datensatzes mit der Massenermittlung für die zu untersuchenden Lebenszyklusphasen
8. Ergebnis Umweltwirkung

Zusammengefasst errechnen sich die Umweltwirkungen der BK (abhängig vom jeweiligen betrachteten Wirkungsindikator i) aus der Summe der Umweltwirkungen der einzelnen Bauteile gemäß Formel 6.2.

$$UW_{BK,w} = \sum UW_{BT,w,j} \quad (6.2)$$

UW_{BK} : Umweltwirkung der BK (A1-3), (B4) und (C3-4)

UW_{BT} : Umweltwirkung des Bauteils (A1-3), (B4) und (C3-4)

w : spezifischer Wirkungsindikator (GWP, AP oder EP)

j : spezifisches Bauteil

Die Umweltwirkung des einzelnen Bauteils errechnet sich aus der Summe der Umweltwirkungen der einzelnen Bauteilschichten und Materialien, gemäß Formel 6.3.

$$UW_{BT,w} = \sum (m_x \times UW_{M,w}) + \sum (m_x \times UW_{M,w}) \times a_x \quad (6.3)$$

UW_{BT} : Umweltwirkung des Bauteils (A1-3), (B4) und (C3-4)

UW_M : Umweltwirkung des Materials (A1-3), (B4) und (C3-4)

m : Referenzeinheit der Bauteilschicht bzw. Material in [kg oder m³]

x : spezifische Bauteilschicht bzw. Material

w : spezifischer Wirkungsindikator (GWP, AP oder EP)

a : Anzahl an Austauschzyklen gemäß Formel 6.5

Für die gesamte TGA ergeben sich die Umweltwirkungen (abhängig vom jeweiligen betrachteten Wirkungsindikator w) aus der Summe der Umweltwirkungen der einzelnen Komponenten gemäß Formel 6.4.

$$UW_{TGA,w} = \sum UW_{k,w} + \sum UW_{k,w} \times a_k \quad (6.4)$$

UW_{TGA} : Umweltwirkung der TGA (A1-3), (B4) und (C3-4)

UW_k : Umweltwirkung der Komponente (A1-3), (B4) und (C3-4)

k : spezifische Komponente

w : spezifischer Wirkungsindikator (GWP, AP oder EP)

a : Anzahl an Austauschzyklen gemäß Formel 6.5

Für die Anzahl an Austauschzyklen gilt:

$$a = \text{Aufrunden} \left(\frac{t_B}{t_N} \right) - 1 \quad (6.5)$$

a : Anzahl an Austauschzyklen

t_B : Betrachtungszeitraum

t_N : Nutzungsdauer des Bauteils, Materials oder der Komponente der TGA

Nutzungsphase (N)

Im Rahmen dieser Dissertation werden zur Ermittlung der Umweltwirkungen für den Energieverbrauch im Betrieb (B6) die einzelnen Energiebedarfe für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung berücksichtigt. Diese werden unter Verwendung von thermischen Gebäudesimulationen ermittelt. Hierzu wird ein thermisches Gebäudemodell unter Berücksichtigung der definierten BK, Gebäudeparameter, Standort, Klima und TGA erstellt. Darauf basierend werden dynamische Simulationen für ein ganzes Jahr (8.760 Stunden) durchgeführt. Verwendet wird dabei die Software IDA ICE (Version 4.8 SP2) von der Firma EQUA [167]. Die Vorteile von dynamisch thermischen Gebäudesimulationen, im Vergleich zu statischen energetischen Bilanzierungen (z. B. nach Gebäudeenergiegesetz (GEG)) [54] liegen darin, dass dynamische Effekte, wie bspw. ein schwankendes Außenklima oder das energierelevante Verhalten von Nutzenden, deutlich realitätsnaher modelliert und berücksichtigt werden kann. Des Weiteren können gebäudespezifische Parameter in einem höheren Detaillierungsgrad definiert und analysiert werden. Die Möglichkeit zur parametrischen Optimierung wird auch im Rahmen dieser Dissertation aufgegriffen und im Kapitel 6.5 näher beschrieben. Zur Ermittlung der Umweltwirkung liefert die thermische Gebäudesimulation den Output der einzelnen Endenergiebedarfe. Mithilfe der Endenergiebedarfe und den jeweiligen Energieträgern werden die Umweltwirkungen ermittelt (siehe Formel 6.6). Diese ergeben sich aus der Summe der Umweltwirkungen der einzelnen Energiebedarfe. Die Umweltwirkung der einzelnen Energiebedarfe ermittelt sich wiederum aus dem Energiebedarf multipliziert mit dem passenden Datensatz zum Energieträger aus der ÖKOBAUDAT.

$$UW_{N,w} = \sum (Q_{E,z} \times WI_{ET,w}) \quad (6.6)$$

UW_N : Umweltwirkung der Nutzungsphase (B6)

$Q_{E,z}$: Jährlicher Energiebedarf für (Heizen, Kühlen, Lüftung oder Beleuchtung)

WI : Wirkungsindikator Nutzung (B6)

ET : Energieträger

w : spezifischer Wirkungsindikator (GWP, AP oder EP)

6.3 Ökosystem-spezifische Kennwerte

6.3.1 Grundlagen

In dem folgenden Kapitel werden die notwendigen Grundlagen zu den verwendeten ökosystem-spezifischen Kennwerten erläutert. Diese ökosystem-spezifischen Kennwerte dienen, in Kombination mit den Ergebnissen aus der Lebenszyklusanalyse (LCA), als Grundlage für die weitere Ermittlung des End-Point-LCA-Indikators, den ökologischen Flächenbedarfs (ELD) (siehe Kapitel 6.4). Im Rahmen der Ermittlung des ELD stellt dies den finalen Schritt dar. Die Ermittlung des emissionsbezogenen ELD basiert grundlegend auf folgenden Eigenschaften von Ökosystemen:

- Stoffeinträge können auf biochemischer Ebene verarbeitet werden
- Es besteht eine maximale Kapazität zur Verarbeitung von Stoffeinträgen
- Es besteht eine ökologische Belastungsgrenze für Stoffeinträge, bei deren Überschreitung mit Verlusten an Biodiversität zu rechnen ist

Die Fähigkeit von Ökosystemen, Stoffeinträge verarbeiten zu können, stellt eine der wichtigsten Eigenschaften im biologischen Kreislauf dar, um Stoffeinträge in organische Materie umzuwandeln. Stoffeinträge sind bis zu einem gewissen Grad essenziell für ein funktionierendes Ökosystem. Zu hohe Einträge können allerdings zu einem Verlust an Biodiversität und damit zur Bedrohung der Existenz von Ökosystemen führen [17]. Des Weiteren verfügen Ökosysteme über eine maximale Kapazität, Stoffeinträge zu verarbeiten, beispielsweise über Fotosynthese. Zudem ist zu beachten, dass es ökologische Belastungsgrenzen gibt, bei deren Überschreitung mit Verlusten an Biodiversität zu rechnen ist. Diese ökologischen Belastungsgrenzen dienen dazu, die Gefährdung von Ökosystemen durch Luftschadstoffe abzuschätzen.

Die ökologischen Belastungsgrenzen dienen dazu, auf nationaler Ebene die Schadstoffemissionen zu regulieren. Basierend auf den festgelegten Umweltindikatoren (Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP)) (siehe Kapitel 6.2.1) werden ökosystem-spezifische Kennwerte unter Berücksichtigung folgender Konzepte verwendet:

1. Konzept der Kohlenstoffdioxid-Assimilation für GWP
2. Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen (CL) für EP und AP

Der erste Schritt zur Ermittlung der ökosystem-spezifischen Kennwerte besteht in der Identifikation von Ökosystemen (in Deutschland). Darauf aufbauend werden die zwei genannten Konzepte erläutert. Abschließend wird in diesem Kapitel die Ermittlung zu den einzelnen Kennwerten erläutert.

Ökosysteme in Deutschland

Ein Ökosystem ist definiert als „kleinste ökologische Einheit eines Lebensraumes mit in ihm wohnenden Lebewesen“ [173]. Für Deutschland können anhand von Angaben nach dem Statistischen Bundesamt, Umweltbundesamt und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) folgende Flächen identifiziert werden (siehe Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1 Flächen von Ökosystemen in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [174–176])

Bezeichnung	Fläche A in ha	Relativer Flächenanteil h in %
Wald	14.959.000	72,3 %
Grünland	4.730.274	22,9 %
Heide	71.451	0,3 %
Moor	79.874	0,4 %
Sumpf	38.521	0,2 %
Gewässer	819.444	4,0 %

Für Deutschland zeigt sich, dass die größte Fläche an Ökosystemen Wälder und Gehölze mit 14.959.000 ha darstellen. Die zweitgrößte Fläche besteht aus Grünland mit 4.730.274 ha. Die weiteren Flächen bestehen aus Heide (71.451 ha), Moor (79.874 ha), Sumpf (38.521 ha) und Gewässer (819.444 ha). Die identifizierten Flächen werden im Kapitel 6.4 für die Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs benötigt.

Konzept der Kohlenstoffdioxid-Assimilation

Die Kohlenstoff-Assimilation beschreibt den biochemischen Prozess, bei dem Kohlenstoff durch lebende Organismen in organischen Verbindungen umgewandelt wird. Grundsätzlich gibt es verschiedenste Prozesse zur Assimilation von Kohlenstoffdioxid, wobei für Pflanzen die Fotosynthese den bedeutendsten Prozess darstellt. In Pflanzen werden durch Fotosynthese Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) unter Verwendung von Sonnenenergie im Blatt (Chlorophyll) zu Traubenzucker ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), Sauerstoff (O_2) und Wasser (H_2O) umgewandelt. Zur Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs werden im Rahmen dieser Dissertation Kennwerte zu den Bindungskapazitäten der verschiedenen Ökosysteme (angegeben in $\text{t CO}_2/(\text{ha a})$) verwendet und in Kapitel 6.3.2 erläutert.

Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen (CL)

Für die ökosystem-spezifische Kennwertermittlung in Bezug auf die Eutrophierung und Versauerung wird auf das Konzept der CL zurückgegriffen. Dieses Konzept stellt einen wirkungsorientierten Ansatz dar, mit dem es möglich ist, die ökologischen Belastungsgrenzen für verschiedene Ökosysteme zu ermitteln und zu quantifizieren. Das Konzept wurde im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (LRTAP-Konvention) der europäischen Wirtschaftskommission (United Nations Economic Commission for Europe) entwickelt [177, 178]. Ziel des Konzepts ist die Schaffung einer einheitlichen Basis für die Luftreinheit und Emissionsminderung zum Schutze von Ökosystemen. Auf nationaler Ebene werden die ermittelten Kennwerte in Genehmigungsverfahren hinsichtlich Immissions- und Naturschutz verwendet. Des Weiteren wird dieses Konzept in der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie zur Bewertung des Indikators „Eutrophierung der Ökosysteme“ verwendet. Der Ansatz zu den CL stellt dabei ein Indikatorsystem für eine dauerhafte und umweltgerechte Entwicklung dar [179]. Die wissenschaftliche Grundlage zur Beschreibung und Anwendung der entwickelten Indikatoren ist umfassend in acht Teilen

beschrieben (Mapping Manual des ICP Modelling & Mapping) [180]. Im Folgenden werden zum Verständnis die wichtigsten Bestandteile kurz erläutert.

Das Konzept der CL ist definiert 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“ (übersetzt aus dem Englischen) [181]. Der Grundgedanke dieses Konzepts besteht darin, den Stoffeintrag, dem ein Ökosystem ausgesetzt ist, mit der Fähigkeit des Ökosystems diesen auszugleichen, gegenüberzustellen. Die ökologischen Belastungsgrenzen können mithilfe folgender Ansätze ermittelt werden [182, 183]:

1. Empirische Untersuchungen: Mithilfe von Feldversuchen werden die Beziehung zwischen dem Eintrag (Deposition) eines Schadstoffs und den Auswirkungen auf das Ökosystem analysiert.
2. Massenbilanzmethode (Simple Mass Balance (SMB)): Ermittlung des maximal möglichen Eintrags basierend auf einem Massenbilanzmodell unter Berücksichtigung biochemischer Prozesse, die Stoffeinträge verarbeiten können (z. B. Aufnahme durch Pflanzen, Abgabe an die Atmosphäre, Akkumulation in Humus und Auswaschung ins Grundwasser)

Angegeben werden die jeweiligen CL als maximale jährliche Einträge pro Hektar für Stickstoff in kg N/(ha a). Die CL für Deutschland wurden vom Umweltbundesamt ermittelt [19, 184]. Die Ermittlung dieser Daten wurde gemäß den Vorgaben des Mapping Manual des ICP Modelling & Mapping durchgeführt [182]. Dabei wurde der Ansatz der Massenbilanzmethode verwendet, wobei folgende Daten verwendet wurden.

- Klimadaten
- Sickerwasserraten
- Landnutzungsdaten
- Depositionsdaten

Die Grundlagen zu der verwendeten Massenbilanzmethode sind im folgenden Kapitel dargestellt.

6.3.2 Ermittlung von Kennwerten

Treibhauspotential

Die Kennwerte für die ökosystem-spezifische Kohlenstoffdioxid-Assimilation beruhen auf einer systematischen Literaturrecherche. Hierbei wurde anhand von geeigneten Studien für jedes Ökosystem die Kohlenstoffdioxid-Bindungskapazität (SeqR) identifiziert und der statistische Mittelwert gebildet.

Wald

Die Kennwerte für das Ökosystem Wald basieren auf den Daten der Kohlenstoffinventur 2017. Diese wurde vom Thünen-Institut für Waldökosysteme im Auftrag des BMEL durchgeführt und ausgewertet [185, 186]. Basierend auf der Klimarahmenkonvention und als Vertragsstaat des Kyoto-Protokolls ist für die Bundesrepublik Deutschland diese Berichterstattung verpflichtend. Erhoben werden dabei Daten zum Zustand, zur Veränderung, zur Nutzung, zum Zuwachs der Waldfläche und des Totholzes. In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse für absorbiertes CO₂ pro Hektar und Jahr in Abhängigkeit der Baumart und der Altersklasse dargestellt. Es zeigt sich, dass die Absorptionsfähigkeit von CO₂ abhängig von der Baumart

und der Altersklasse eine hohe Streuung aufweist. In Bezug auf die Altersklasse ist zu erkennen, dass Bäume in den ersten 1–20 Jahren ca. 3,4 t CO₂/(ha a) binden. Das Maximum erreichen Bäume in der Altersklasse 21–40, mit 16,2 t CO₂/(ha a). In den folgenden Altersklassen nimmt die durchschnittliche Bindungsfähigkeit stetig ab. Der Mittelwert unter Berücksichtigung der relativen Flächenanteile aus den Einzelwerten beträgt 10,86 t CO₂/(ha a). Aufgrund der hohen Streuung ist auch die Standardabweichung mit ±3,67 im relativ hoch.

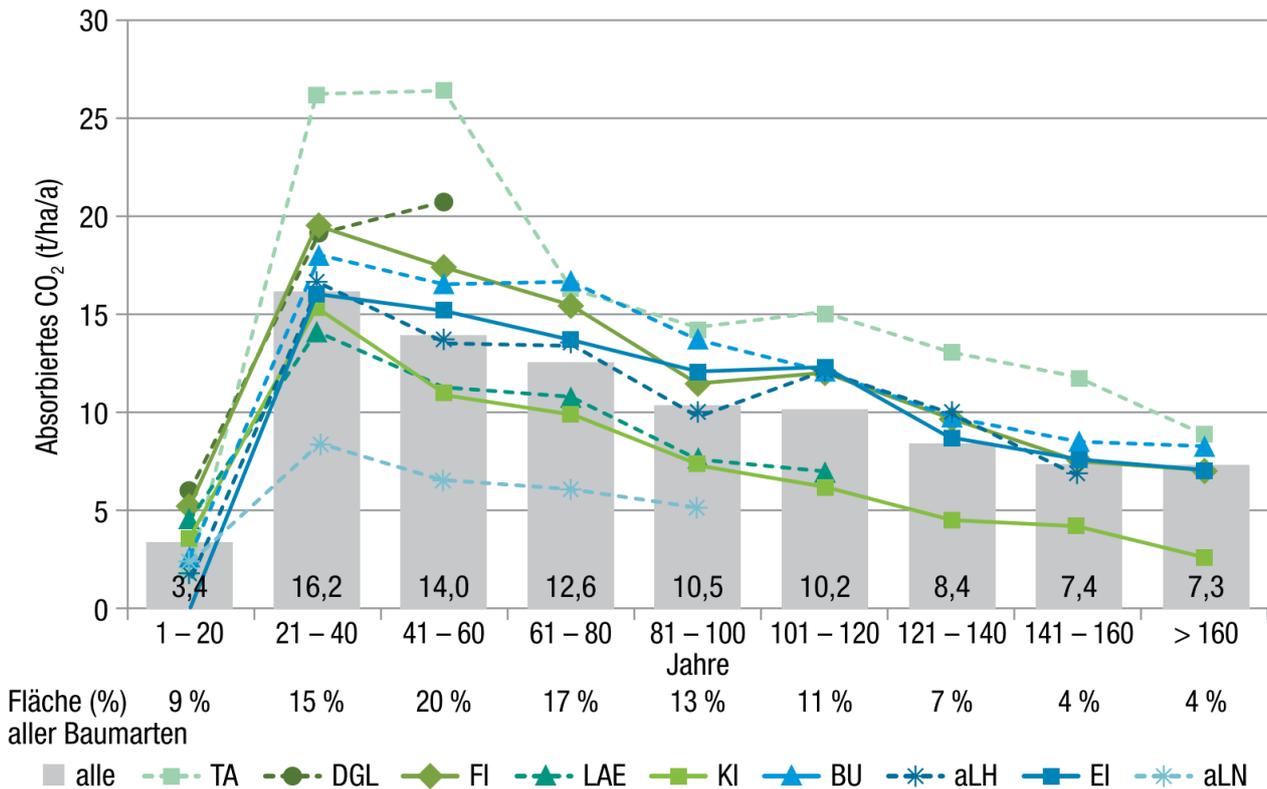


Abbildung 6.4 Absorbiertes CO₂ in t CO₂/(ha a) nach Altersklassen und Baumart; TA = Tanne, DGL = Douglasie, FI = Fichte, LAE = Lärche, KI = Kiefer, BU = Buche, aLH = andere Laubbäume mit hoher Lebensdauer, EI = Eiche, aLN = andere Laubbäume mit niedriger Lebensdauer (Quelle: [185])

Grünland

Für das Ökosystem Grünland basieren die Daten auf drei verschiedenen Studien: dem Grünlandreport des Bundesamt für Naturschutz (BfN), einem Bericht über die CO₂-Bindungskapazität verschiedener Ökosysteme der Einrichtung Natural England (öffentliche Körperschaft für Naturschutz-Beratung und Planung im Vereinigten Königreich) und einer Analyse von Grünlandökosystemen der Landwirtschaftskammer Oberösterreich. Der Grünlandreport weist in Bezug auf die CO₂-Bindungskapazität darauf hin, dass Grünland nur als CO₂-Senke fungiert, solange das spezifische Kohlenstoffgleichgewicht noch nicht erreicht ist. Für Deutschland wird konstatiert, dass Grünland noch mindestens 100 Jahre als CO₂-Senke dient. Des Weiteren zeigen alle drei Studien, dass die CO₂-Bindungskapazität maßgeblich von der Art der Bewirtschaftung abhängt. Im Grünlandreport werden für extensiv genutztes Grünland ein CO₂-Bindung von 10,3 t CO₂/(ha a) aufgeführt. [187]

Für ein Grünland, welches gepflegt wird, gibt der Bericht von Natural England eine CO₂-Bindung von 2,20 t CO₂/(ha a) an, wobei nicht näher definiert ist, um welche Art der Pflege es sich handelt [188].

Detailliertere Angaben liefert der Bericht der Landwirtschaftskammer Oberösterreich. Hierbei sind Angaben zur CO₂-Bindung einer Hutwiese (6,0 t CO₂/(ha a)), Streuwiese (6,0 t CO₂/(ha a)), Einmähdige Wiese (7,0 t CO₂/(ha a)) und Mähwiese (10,8 t CO₂/(ha a)) angegeben [189]. Anhand der Daten ergibt sich ein Mittelwert von 7,22 t CO₂/(ha a) mit einer Standardabweichung von ±2,86.

Heiden

Für Heiden ergeben sich, basierend auf der Studie von Sozanska-Stanton und dem Bericht von Natural England, eine Spannweite in der CO₂-Bindungskapazität von 0,02 bis 5,6 t CO₂/(ha a) [190, 191]. Es zeigt sich, dass Heide im Vergleich zu Wäldern und Grünland eine deutlich geringere CO₂-Bindung aufweisen. Wie auch beim Grünland, wird in Bezug auf die Heide in beiden untersuchten Studien konstatiert, dass die CO₂-Bindung maßgeblich von der Nutzungsart abhängt. Aus den Studien ergibt sich ein Mittelwert von 2,70 t CO₂/(ha a) mit einer Standardabweichung von ±2,22.

Sümpfe und Moore

Sümpfe und Moore sind bedeutende Kohlenstoffspeicher. Dies zeigt sich daran, dass global rund 30 % des weltweiten Bodenkohlenstoffs auf Moore fallen. Damit einhergehend bergen diese Ökosysteme aber auch große Risiken für die Freisetzung von gebundenem Kohlenstoff, bspw. durch den Torfabbau und Trockenlegung. Für naturnahe und unberührte Flächen gibt Drösler eine CO₂-Bindungskapazität im Mittel von ca. 3,66 t CO₂/(ha a) an. Des Weiteren betont Drösler das große Potenzial der Moorrenaturierung für Klimaschutzprojekte. Er weist ein CO₂-Reduktionspotential für Regenmoore von ca. 15 t CO₂/(ha a) und Grundwassermoore von ca. 30 t CO₂/(ha a) aus. [192, 193]

Darüber hinaus liefert das Natural England in zwei Berichten aus dem Jahre 2012 und 2021 geeignete Daten für naturnahe Sümpfe und Moore. Gemäß [188] wird für naturnahe Flächen eine CO₂-Bindungskapazität von etwa 4,11 t CO₂/(ha a) angegeben. In dem aktuellen Bericht aus 2021 sind die Zahlen deutlich geringer [191]. Hierbei werden für naturnahe Flächen Werte zwischen 0,02 und 0,93 t CO₂/(ha a) angegeben. Grundsätzlich zeigt sich, dass bei naturnahen Flächen die Bindungskapazitäten deutlich unterhalb der von Wäldern und Grünland liegen. Aus den Studien ergibt sich ein Mittelwert für Moore von 2,81 t CO₂/(ha a) mit einer Standardabweichung von ±1,74 und für Sümpfe von 1,68 t CO₂/(ha a) mit einer Standardabweichung von ±1,75.

Gewässer

Forschende geben für Gewässer an, dass besonders Seen, Bäche und Flüsse Nettoquellen von CO₂ darstellen. Seen binden zwar Kohlenstoff in den Sedimenten, weisen aber gemäß [194] in Summe eine CO₂-Emission an die Atmosphäre auf. Dies liegt gemäß einer Studie von Marcé et al. insbesondere an der Austrocknung der Gewässer aufgrund eines wärmer werdenden Klimas [195]. Zusammenfassend geben alle Studien an, dass eine Quantifizierung des Kohlenstoffkreislaufs schwierig ist, da zum einen die Datenlage schlecht ist und es noch großen Forschungsbedarf gibt. Raymond et al. konstatieren, dass bislang keine umfassenden, räumlich aufgelösten Schätzungen des globalen CO₂-Austauschs zwischen Binnengewässern und der Atmosphäre vorgenommen wurden [196]. Da auf der aktuellen Studienlage keine einheitlichen Angaben zur CO₂-Bindungskapazität von Gewässern gemacht werden kann, werden im Folgenden dem Gewässer keine Bindungspotentiale zugeschrieben.

Die Zusammenfassung aller Studien mit den jeweiligen identifizierten Spannweiten, ermittelten Mittelwerten und Standardabweichungen sind in Tabelle 6.2 auf Seite 68 aufgeführt.

Tabelle 6.2 Kohlenstoffdioxid-Bindungskapazität (SeqR) verschiedener Ökosysteme in t CO₂/(ha a) (eigene Darstellung)

Ökosystem	Spannweite in t CO ₂ /(ha a)	Mittelwert & Standardabweichung in t CO ₂ /(ha a)	Quellen
Wald	3,4... 16,2	10,86 ± 3,67	[185, 186]
Grünland	2,2... 10,8	7,22 ± 2,86	[187–189]
Heide	0,02... 5,6	2,70 ± 2,22	[190, 191]
Moor	0,02... 4,11	2,81 ± 1,74	[188, 191–193]
Sumpf	0,02... 4,11	1,68 ± 1,75	[191]
Gewässer	-	-	[194–197]

Für die Berechnungen der CO₂-Bindungsraten im Rahmen dieser Dissertation werden die in Tabelle 6.2 dargestellten Mittelwerte für die jeweiligen Ökosysteme herangezogen.

Eutrophierung

Die Kennwerte für die CL hinsichtlich der Eutrophierung basieren auf Angaben des Umweltbundesamtes [19]. Die ermittelten Grenzwerte basieren auf der Simple Mass Balance (SMB). In diesem methodischen Ansatz werden die CL gemäß dem maximal zulässigen Eintrag an Stickstoff als ein Gleichgewicht zwischen Stoffein- und -austrag beschrieben. Der dabei zugrunde gelegte Zustand entspricht einem quasi-stationären Zustand. Wird dieser quasi-stationäre Zustand eingehalten, so kann davon ausgegangen werden, dass das jeweilige Habitat vor einer übermäßigen Eutrophierung geschützt ist und ein natürlicher Zustand gewährleistet wird. Den mathematischen Zusammenhang hierfür beschreibt Formel 6.7.

$$CL_{nut}N = N_u + N_i + \frac{N_{de}}{1 - f_{de}} \quad (6.7)$$

$CL_{nut}N$: Ökologische Belastungsgrenze für eutrophierenden Stickstoffeintrag [kg N/(ha a)]

N_u : Netto-Stickstoff-Aufnahmerate durch die Vegetation [kg N/(ha a)]

N_i : Netto-Stickstoff-Immobilisierungsrate [kg N/(ha a)]

N_{de} : Denitrifikation von Stickstoff [kg N/(ha a)]

f_{de} : Denitrifikationsfaktor (Funktion der Bodentypen, Wert zwischen 0 und 1)

Die CL für den maximalen eutrophierenden Stickstoffeintrag $CL_{nut}N$ setzt sich zusammen aus den Komponenten der Netto-Stickstoffaufnahme durch die Vegetation N_u , der Netto-Stickstoff-Immobilisierungsrate N_i , der Denitrifikation von Stickstoff N_{de} und dem Denitrifikationsfaktor f_{de} .

Die Netto-Stickstoff-Aufnahmerate N_u ist ein Faktor zur Beschreibung des Stickstoffgehalts in der oberirdischen pflanzlichen Biomasse. Ermittelt wird dieser durch die Ermittlung der erntbaren Biomasse und

dem darin enthaltenen Gehalt an Stickstoff. In diesem Ansatz wird nur der gebundene Stickstoff in der erntbaren Biomasse berücksichtigt, bspw. Holzernte. Grundsätzlich wird hierbei in den jeweiligen Habitaten eine bestandserhaltende Mindestnutzung angenommen. Die bestandserhaltende Mindestnutzung oder auch Pflegenutzung weist wiederum eine große Varianz auf, da diese stark vom jeweiligen Standort und Habitattyp abhängig ist.

In Ergänzung zu dem gebundenen Stickstoff in der oberirdischen Biomasse beschreibt die Netto-Stickstoff-Immobilisierungsrate N_i die dauerhafte organische Bindung von Stickstoff in der Humusschicht. Dauerhaft gebundener Stickstoff ist ungelöst und steht damit für Pflanzen nicht zur Verfügung. Abhängig ist die Netto-Stickstoff-Immobilisierungsrate von biochemischen Vorgängen, wie zum Beispiel dekompostierenden Bodenorganismen. Die Aktivität von dekompostierenden Bodenorganismen ist wiederum stark von der Bodentemperatur, Wassergehalt, Nährkationen und Kohlenstoffgehalt abhängig.

Stickstoff wird nicht nur in der oberirdischen Biomasse und im Humus gebunden, sondern teilweise wieder an die Atmosphäre abgegeben. Die Denitrifikation von Stickstoff N_{de} beschreibt den Vorgang, des Umwandeln von Nitrat und Nitrit in Stickstoff und Stickoxide. Stickstoff und Stickoxide werden dann wiederum an die Atmosphäre abgegeben. Dieser Prozess ist wie die Netto-Stickstoff-Immobilisierungsrate von Bodenorganismen abhängig. Deren Aktivität ist wiederum von der Bodentemperatur, Wassergehalt, Nährkationen und Kohlenstoffgehalt abhängig. Die Denitrifikation wird vom Denitrifikationsfaktoren f_{de} beeinflusst, welcher wiederum vom Tongehalt des Bodens abhängt. Je höher der Tongehalt, desto höher die Denitrifikationsrate.

Basierend auf dem beschriebenen mathematischen Sachverhalt ergeben sich anhand des bundesweiten Datensatzes gemäß Umweltbundesamt die in Abbildung 6.5 dargestellten CL [184]. Es zeigt sich, dass in dem bundesweiten Datensatz die CL für die Ökosysteme Wald, Grünland, Heide, Sumpf und Moor angegeben sind und Kennwerte zu Gewässern fehlen. Ergänzt werden die Daten zu den Gewässern gemäß weiteren Angaben des Umweltbundesamts und dem Landesamt für Umwelt in Bayern [19, 198, 199].

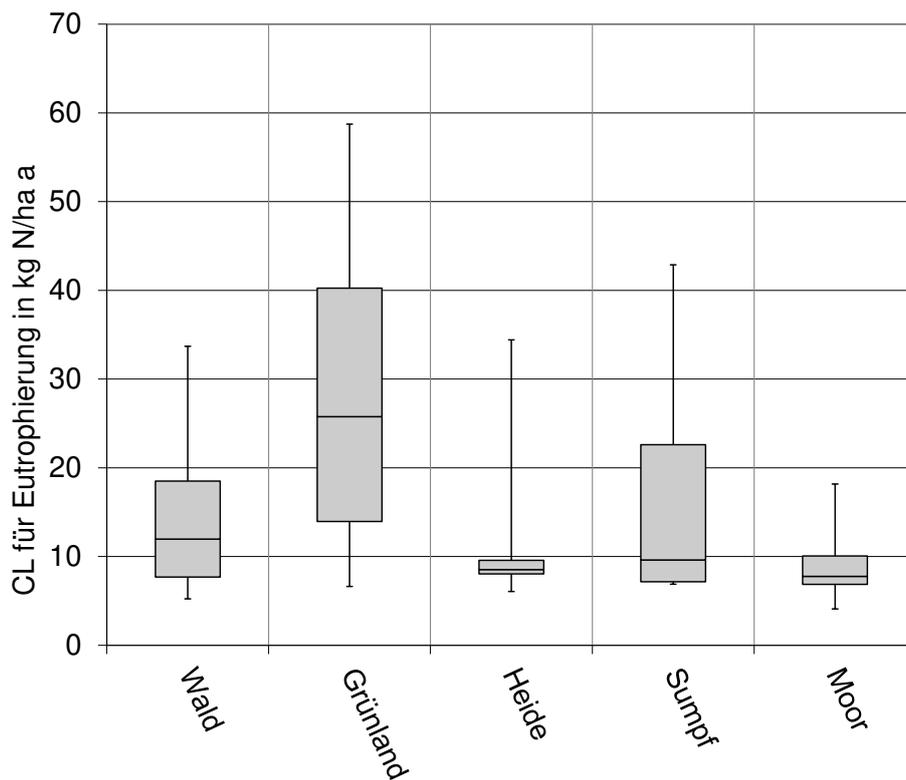


Abbildung 6.5 Sensitivität der ökologischen Belastungsgrenzen (CL) für eutrophierenden Stickstoff verschiedener Ökosysteme gemäß in kg N/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [184])

Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 6.3 zeigt sich, dass die CL für die verschiedenen Ökosysteme ähnliche Spannweiten und Mittelwerte aufweisen. Für das Ökosystem Wald ergibt sich ein Mittelwert von 14,5 kg N/(ha a) und eine Standardabweichung von $\pm 9,1$ kg N/(ha a). Grünland weist einen Mittelwert von 28,2 kg N/(ha a) und eine Standardabweichung von $\pm 16,7$ kg N/(ha a) auf. Anhand der Daten zeigt sich, dass Grünland weniger empfindlich gegenüber eutrophierenden Stickstoffeinträgen ist. Empfindlicher sind dagegen Heiden, die einen Mittelwert von 12,6 kg N/(ha a) und eine Standardabweichung von $\pm 11,6$ kg N/(ha a) aufweisen. Am empfindlichsten sind Moore, die einen geringen Mittelwert von 9,6 kg N/(ha a) und eine Standardabweichung von $\pm 6,3$ kg N/(ha a) aufweisen. Die Daten zu den Gewässern basieren auf einzelnen Angaben zu verschiedenen Gewässertypen. Die Daten ergeben einen Mittelwert von rund 13,3 kg N/(ha a) und eine Standardabweichung von $\pm 5,3$ kg N/(ha a).

Tabelle 6.3 Ökologische Belastungsgrenze (CL) für eutrophierenden Stickstoff verschiedener Ökosysteme in kg N/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [19, 184, 198, 199])

Ökosystem	Spannweite in kg N/(ha a)	Mittelwert & Standardabweichung in kg N/(ha a)
Wald	5...34	14,5 ± 9,1
Grünland	7...59	28,2 ± 16,7
Heide	6...34	12,6 ± 11,6
Sumpf	7...43	17,3 ± 16,1
Moor	4...18	9,6 ± 6,3
Gewässer	-	13,3 ± 5,3

Versauerung

Die CL für den maximalen versauernden Schwefeleintrag $CL_{max}S$ (siehe Formel 6.8) setzt sich zusammen aus den Komponenten der Depositionsrate basischer Kationen BC_{dep}^* , der Depositionsrate von Chloridionen Cl_{dep}^* , der Freisetzungsrate basischer Kationen durch die Verwitterung BC_w , der Nettoaufnahmerate basischer Kationen durch die Vegetation Bc_u und der kritischen Austragungsrate der Säureneutralisationskapazität mit dem Sickerwasser $ANC_{le(crit)}$.

$$CL_{max}S = BC_{dep}^* - Cl_{dep}^* + BC_w - Bc_u - ANC_{le(crit)} \quad (6.8)$$

$CL_{max}S$: Ökologische Belastungsgrenze für Schwefel [Äq./ha a]

BC_{dep}^* : Rate der Deposition basischer Kationen [Äq./ha a]

Cl_{dep}^* : Rate Deposition von Cloridionen [Äq./ha a]

BC_w : Freisetzungsrate basischer Kationen durch die Verwitterung [Äq./ha a]

Bc_u : Nettoaufnahmerate basischer Kationen durch die Vegetation [Äq./ha a]

$ANC_{le(crit)}$: Kritische Austragungsrate der Säureneutralisationskapazität
mit dem Sickerwasser [Äq./ha a]

Grundsätzlich beschreibt die Deposition die Ablagerung von Luftschadstoffen an der Erdoberfläche. Die Depositionsrate basischer Kationen BC_{dep}^* bezieht sich dabei spezifisch auf die Ablagerung von basischen Kationen. Hierunter zählen beispielsweise Calcium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Natrium (Na). Äquivalent dazu beschreibt die Depositionsrate von Chloridionen Cl_{dep}^* die Ablagerung von Chloridionen. Die in den Berechnungen zugrunde gelegten Werte basieren auf eigenen Berechnungen des Umweltbundesamts [200].

Im Rahmen von Verwitterungsprozessen werden basische Kationen freigesetzt, die Rate der Freisetzung wird mit dem Faktor der Freisetzungsrates basischer Kationen durch die Verwitterung BC_w beschrieben. Abhängig ist die Freisetzungsrates vom vorhandenen Ausgangssubstrat und der Textur des Bodens. Die in

den Berechnungen des Umweltbundesamts zugrunde gelegten Substratklassen basieren auf den Angaben der Bodenübersichtskarte BÜK 1000N der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [201]. Die Textur des Bodens basiert auf der bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 der Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [202].

Die Nettoaufnahme basischer Kationen durch die Vegetation Bc_v beschreibt den Entzug von basischen Kationen aus dem Erdreich durch Pflanzen. Maßgebliche Grundlage hierfür ist die Entnahme der Biomasse aus dem jeweiligen Habitat, die Zuwachsrate und die durchschnittlichen Stoffgehalte. Die einzelnen notwendigen Kennwerte basieren gemäß Umweltbundesamt auf verschiedenen Literaturkennwerten wie in [19] beschrieben.

Die kritische Austragungsrate der Säureneutralisationskapazität mit dem Sickerwasser $ANC_{le(crit)}$ beschreibt einen Faktor, mit dem der Eintrag von versauernden Einträgen ins Sickerwasser beschrieben wird. Zur Ermittlung, wie hoch die maximal zulässige Austragungsrate sein darf, wird anhand von verschiedenen Schutzziele individuell ermittelt. Berücksichtigt sind dabei folgende Schutzziele:

- Kriterium 1: Schutz der Pflanzen
- Kriterium 2: Erhaltung des bodentypischen Pufferbereiches zur Regulierung des Säuregehalts
- Kriterium 3: Erhaltung der Bodenstabilität
- Kriterium 4: Erhaltung des bodentypischen pH-Wertes

Die CL zum Schutz vor Versauerung wird basierend auf jedem einzelnen Schutzziel berechnet. Um die empfindlichste Komponente des Ökosystems zu berücksichtigen, wird für den deutschen Datensatz der CL_{maxS} basierend auf dem niedrigsten Kriterium übernommen.

Basierend auf dem aktuellsten bundesweiten Datensatz, herausgegeben vom Umweltbundesamt, ergeben sich die Abbildung 6.6 auf Seite 73 dargestellten Kennwerte. Äquivalent zu den Angaben für die Eutrophierung fehlen im deutschen Datensatz auch Angaben zu den CL in Bezug auf versauernden Schwefel. Ergänzt werden die Daten zu den Gewässern gemäß de Vries et al., in der CL für terrestrische und auch aquatische Ökosysteme unter anderem für Europa angegeben sind [203].

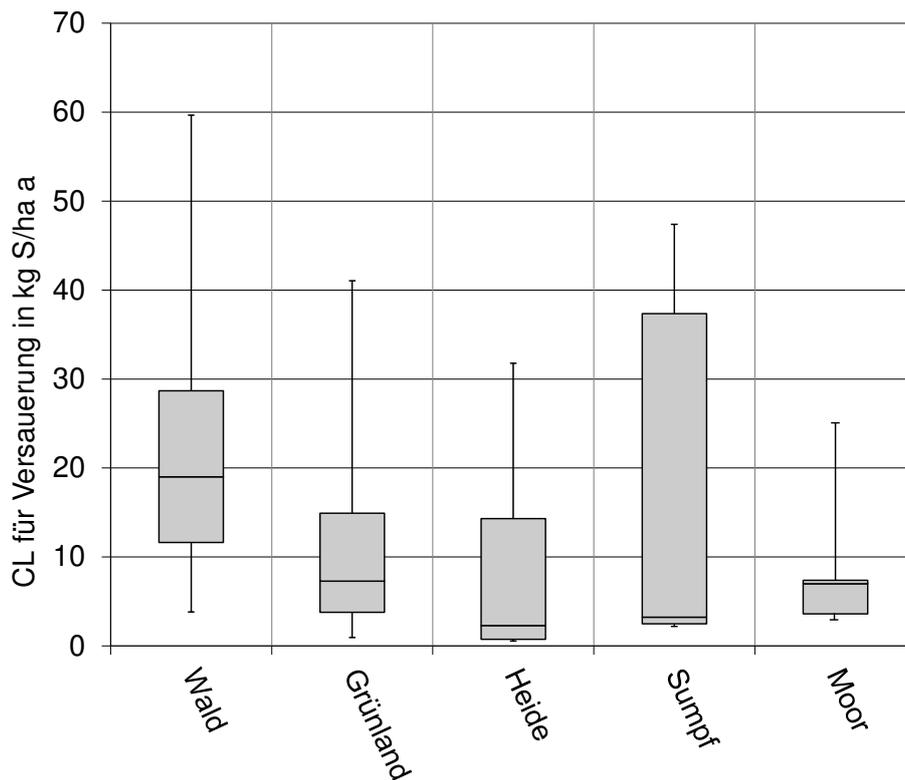


Abbildung 6.6 Sensitivität der ökologischen Belastungsgrenzen (CL) für versauernden Schwefel verschiedener Ökosysteme in kg S/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [184])

Die einzelnen Werte gemäß dem deutschen Datensatz sind in Tabelle 6.4 auf Seite 74 aufgelistet. Für das Ökosystem Wald ergibt sich eine Spannweite der CL von 4 bis 60 kg S/(ha a), der Mittelwert beträgt 23,3 kg S/(ha a) mit einer Standardabweichung von $\pm 19,9$ kg S/(ha a). Im Vergleich zum Wald liegen die CL für Grünland deutlich geringer, das heißt Grünland ist tendenziell empfindlicher gegenüber versauernden Stoffeinträgen. Für Grünland ergibt sich, basierend auf der Spannweite von 1 bis 41 kg S/(ha a) ein Mittelwert von 12,4 kg S/(ha a) und eine Standardabweichung von $\pm 12,6$ kg S/(ha a). Nochmals empfindlicher reagieren Heiden auf versauernden Schwefel. Für Heiden ergibt sich ein Mittelwert von 7,5 kg S/(ha a) mit einer Standardabweichung von $\pm 9,6$ kg S/(ha a). Bei Sümpfen zeigt sich, verglichen mit den anderen Ökosystemen, ein deutlich größerer Interquartilsabstand (Abstand zwischen dem oberen und unteren Abschluss der Box) in den Boxplots. Das bedeutet, dass die CL für Sümpfe in Abhängigkeit von deren Häufigkeit breit verteilt sind. Für Sümpfe ergibt sich ein Mittelwert von 17,4 kg S/(ha a) mit einer recht hohen Standardabweichung von $\pm 17,8$ kg S/(ha a). Empfindlicher reagieren Moore auf versauernden Schwefel; hier liegt der Mittelwert bei 7,9 kg S/(ha a) und die Standardabweichung bei $\pm 8,1$ kg S/(ha a). Wie bereits erwähnt, gibt der bundesweite Datensatz über keine Angaben zu Gewässern an. Gemäß den Daten von de Vries et al. zeigt sich, dass europäische Gewässer einen CL von ca. 1 bis 64 kg S/(ha a) aufweisen [203]. Anhand deren Häufigkeitsverteilung ergibt sich ein Mittelwert von rund 14 kg S/(ha a). Genauere Angaben zur Standardabweichung sind anhand der verfügbaren Daten nicht möglich.

Tabelle 6.4 Ökologische Belastungsgrenze (CL) für versauernden Schwefel verschiedener Ökosysteme in kg S/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [184, 203])

Ökosystem	Spannweite in kg S/(ha a)	Mittelwert & Standardabweichung in kg S/(ha a)
Wald	4...60	23,3 ± 19,9
Grünland	1...41	12,4 ± 12,6
Heide	1...32	7,5 ± 9,6
Sumpf	2...47	17,4 ± 17,8
Moor	3...27	7,9 ± 8,1
Gewässer	1...64	14

Zusammenfassend zeigt sich, dass die analysierten Ökosysteme verschiedene CO₂-Bindungskapazitäten und ökologische Belastungsgrenzen aufweisen. In der Berechnung des ELD (siehe Kapitel 6.4) werden diese unterschiedlichen ökosystem-spezifischen Kennwerte und die Flächenverteilung der betrachteten Ökosysteme (siehe Tabelle 6.1 auf Seite 64) verwendet. Dadurch ist eine hohe Repräsentativität für die definierte Systemgrenze gewährleistet.

6.4 Kombination der Berechnungsmethoden

6.4.1 Annahmen und Vereinfachungen

Im Folgenden werden die definierten Annahmen und Vereinfachungen bei der Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) dargestellt. Die Ermittlung des ELD basiert auf den Umweltwirkungen von Gebäude-Lebenszyklusanalysen (LCA) und ökosystem-spezifischen Kennwerten. In Bezug auf die LCA und dabei ermittelten Emissionen ist zu berücksichtigen, dass diese regional nicht begrenzt sind. Als Beispiel lässt sich hier das deutsche Stromnetz zur Veranschaulichung verwenden. Anlagen, die Strom für das deutsche Stromnetz liefern, sind über den kompletten deutschen Raum und auch über die Landesgrenzen hinaus verteilt. Das heißt, Emissionen treten an verschiedensten Orten auf. Des Weiteren ist bei den Emissionen zu beachten, dass diese durch atmosphärische Prozesse regional verteilt werden können. Das heißt, der Ort des Auftretens der Emission und der Ort der Wirkung sind unter Umständen nicht derselbe. Des Weiteren basieren die Berechnungen auf ökosystem-spezifischen Eigenschaften und Kennwerten. Wie beschrieben, handelt es sich bei den verwendeten Kennwerten um Momentaufnahmen. Aufgrund von Änderungen an den Ökosystemen können sich diese Kennwerte ändern. Da in dieser Arbeit aber weder biochemische Prozesse von Ökosystemen noch dynamische Prozesse in der Atmosphäre betrachtet werden, werden folgende Vereinfachungen und Annahmen getroffen:

Räumliche Systemgrenze

- Die Berechnungen beziehen sich auf die Bundesrepublik Deutschland
- Alle Emissionen werden gleichmäßig über die bundesweiten Ökosysteme verteilt

Zeitliche Systemgrenze

- Zeitliche Verzögerungen zwischen Auftreten und Wirkung der Emissionen werden vernachlässigt
- Zeitliche Änderungen von Ökosystemen werden vernachlässigt

Die getroffenen Vereinfachungen und Annahmen zu den räumlichen Systemgrenzen führen dazu, dass die Ergebnisse dieser Arbeit nicht direkt auf andere Länder und Regionen übertragen werden können. Hierzu sind weitere Berechnungen mit ökosystem-spezifischen Kennwerten und Ökobilanz-Datensätze für das zu betrachtende Land notwendig. In Bezug auf die zeitlichen Systemgrenzen werden die Verzögerungen zwischen Auftreten und Wirkung der Emissionen auf die Ökosysteme vernachlässigt. Das heißt, dass keine Angaben dazu gemacht werden können, wann die Wirkungen auftreten. Des Weiteren werden potenzielle zukünftige Änderungen innerhalb der Ökosysteme vernachlässigt. Hierzu sind weitere dynamische Berechnungsmethoden wie beispielsweise Klimasimulationen notwendig.

6.4.2 Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD)

In den vorherigen Kapiteln wurden die notwendigen Grundlagen der LCA, die Ermittlung der ökosystem-spezifischen Kennwerte und die Umrechnung auf die gemeinsame funktionelle Einheit beschrieben. Im Folgenden wird darauf aufbauend der mathematische Sachverhalt zur Ermittlung des ELD beschrieben. Wie die einzelnen Schritte aufeinander aufbauen, ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

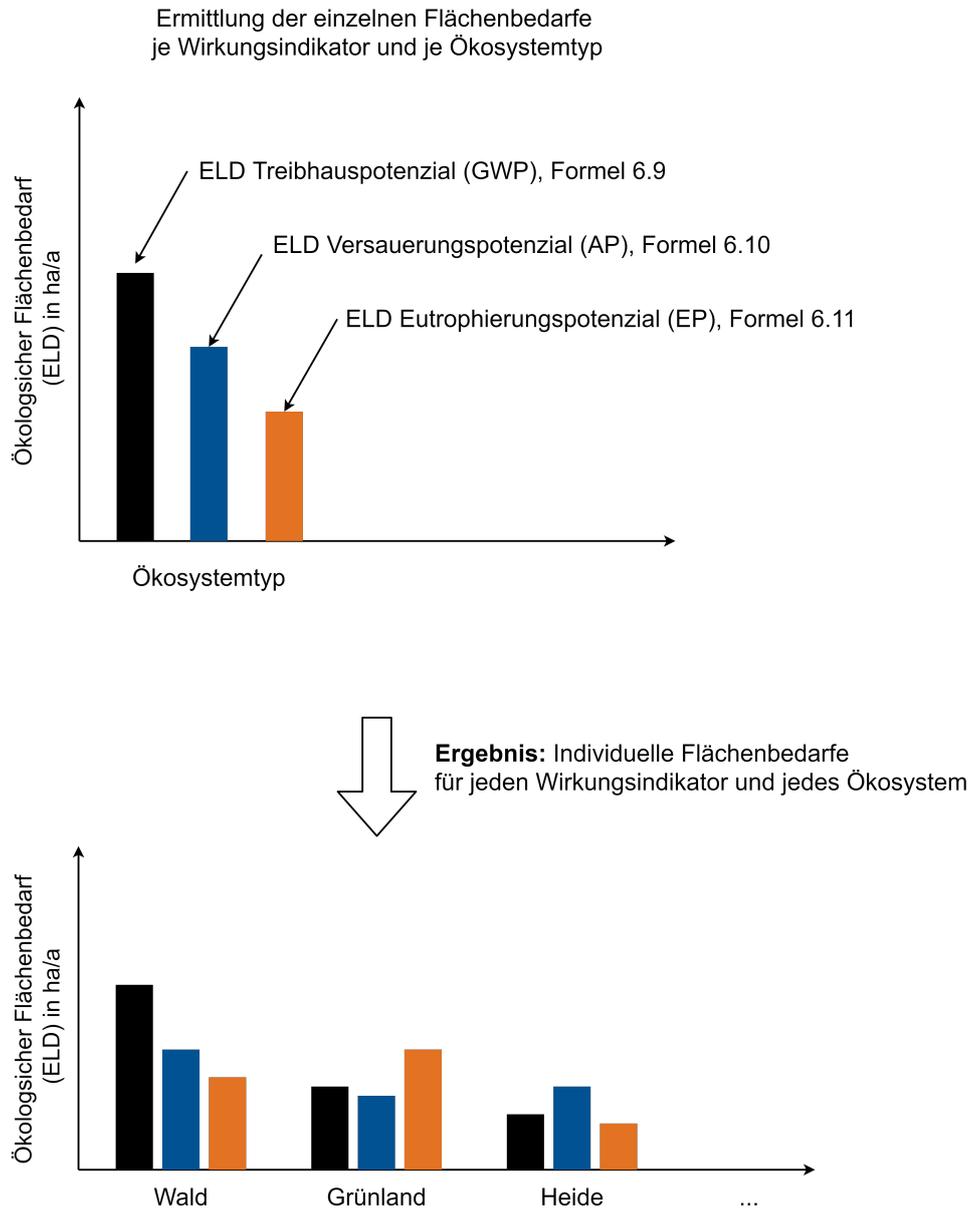


Abbildung 6.7 Darstellung der Ermittlung der einzelnen ökologischen Flächenbedarfe je Wirkungsindikator und je Ökosystem (eigene Darstellung)

Die spezifischen Berechnungen zu den Flächenbedarfsanteilen für das Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) sind in den folgenden Formeln erläutert. Der ELD für das Treibhauspotenzial (GWP) wird gemäß Formel 6.9 berechnet.

$$ELD_{GWP,n} = \frac{UW_{Ges,GWP} \times h_n}{SeqR_{CO_2,n}} \quad (6.9)$$

ELD_{GWP} : ELD basierend auf GWP [ha/a]

$UW_{Ges,GWP}$: Gesamte Umweltwirkungen für GWP [kg CO₂-Äq.]

h : relativer Flächenanteil [%]

$SeqR_{CO_2}$: Kohlenstoffdioxid-Bindungskapazität [kg CO₂/(ha a)]

n : Ökosystemtyp gemäß Tabelle 6.1

Der ökologische Flächenbedarf in Bezug auf das Eutrophierungspotenzial (EP) ergibt sich gemäß Formel 6.10.

$$ELD_{EP,n} = \frac{UW_{Ges,EP} \times CF_{EP} \times h_n}{CL_{nut}N_n} \quad (6.10)$$

ELD_{EP} : ELD basierend auf EP [ha/a]

$UW_{Ges,EP}$: Gesamte Umweltwirkungen für EP [kg PO₄⁻³-Äq.]

CF_{EP} : Charakterisierungsfaktor zur Umrechnung von Phosphat-Äq. in Stickstoff-Äq.

h : relativer Flächenanteil [%]

$CL_{nut}N$: Ökologische Belastungsgrenze für eutrophierenden Stickstoffeintrag [kg N/(ha a)]

n : Ökosystemtyp gemäß Tabelle 6.1

Der ökologische Flächenbedarf in Bezug auf das Versauerungspotenzial (AP) ergibt sich gemäß Formel 6.11.

$$ELD_{AP,n} = \frac{UW_{Ges,AP} \times CF_{AP} \times h_n}{CL_{max}S_n} \quad (6.11)$$

ELD_{AP} : ELD basierend auf AP [ha/a]

$UW_{Ges,AP}$: Gesamte Umweltwirkungen für AP [kg SO₂-Äq.]

CF_{AP} : Charakterisierungsfaktor zur Umrechnung von Schwefeldioxid-Äq. in Stickstoff-Äq.

h : relativer Flächenanteil [%]

$CL_{max}S$: Ökologische Belastungsgrenze für eutrophierenden Schwefeleintrag [kg S/(ha a)]

n : Ökosystemtyp gemäß Tabelle 6.1

Die Outputs der LCA werden anhand von Mid-Point Indikatoren bezogen auf eine spezifische Äquivalenteinheit angegeben. Bei der ÖKOBAUDAT wird zur Wirkungsbewertung die Methode CML 2001 verwendet [204]. Die CML 2001 stellt eine, von der Universität Leiden entwickelte Methode zur Wirkungsbewertung von Emissionen dar. Die Emissionen werden dabei anhand von gemeinsamen Wirkungen wie Klimawandel oder Eutrophierung zusammengefasst. Für den jeweiligen Wirkungsindikator stehen Charakterisierungsfaktoren (CF) (gemäß Universität Leiden und DIN EN 15804) zur Verfügung, um die Ergebnisse der LCA in andere gängige Einheiten umzurechnen, um sie für biochemische Prozesse nutzbar zu machen [6, 204].

Das GWP wird in kg CO₂-Äq. angegeben. Da sich der notwendige Input für die ökosystem-spezifische Bewertung auf CO₂ bezieht, ist eine Umrechnung nicht notwendig.

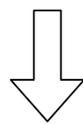
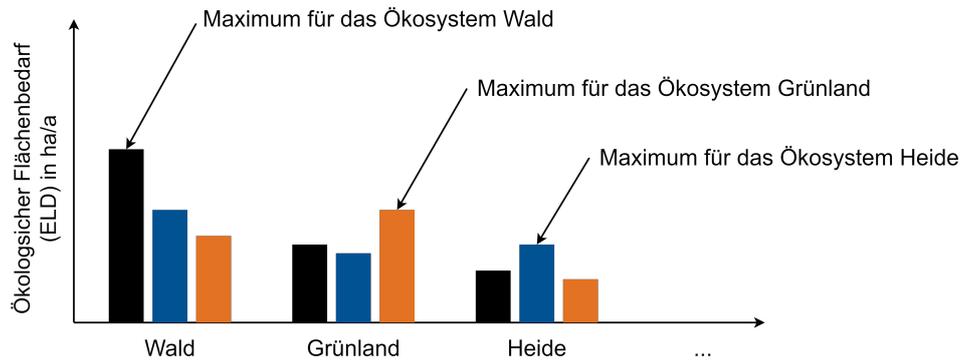
Das EP wird gemäß der ÖKOBAUDAT in Phosphat-Äquivalenten [kg PO₄⁻³-Äq.] angegeben. Die ökosystem-spezifischen Kennwerte aus dem Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen beziehen sich auf Stickstoff. Für die Umrechnung von Phosphat (PO₄⁻³) in Stickstoff (N) ist ein Charakterisierungsfaktor von CF_{EP} = 0,42 angegeben [6, 204].

Im Hinblick auf das AP ist zu berücksichtigen, dass Schwefeldioxid (SO₂) in der Atmosphäre in Sulfat (SO₄⁻²) umgewandelt wird. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die vollständige Umwandlung von SO₂ zu SO₄⁻² von der Zusammensetzung der Atmosphäre abhängig ist. Die Umwandlungsrate kann daher in der zeitlichen Komponente variieren. [205]

Da im Rahmen dieser Arbeit atmosphärische Prozesse und die damit verbundenen zeitlichen Aspekte nicht berücksichtigt werden, wird angenommen, dass die Menge an SO₂ mit der von SO₄⁻² gleichzusetzen ist. Einziger Aspekt, der berücksichtigt werden muss, ist, dass sich die ökologischen Belastungsgrenzen auf die in den Emissionen enthaltene Menge an Schwefel beziehen [206, 207]. Für die Schwefeldioxid-Emissionen (SO₂-Emissionen) ist daher anhand der molaren Masse die Menge an enthaltenem Schwefel zu ermitteln. Die molare Masse von Schwefel beträgt 32 g/mol, für Sauerstoff 16 g/mol. In einem Schwefeldioxid Molekül sind 1 Schwefelatom und 2 Sauerstoffatome enthalten. Das heißt, in 1 kg SO₂ sind 0,5 kg Schwefel enthalten. Damit erfolgt eine Umrechnung von SO₂ zu S mit dem Faktor CF_{AP} = 0,50.

Die Ermittlung des gesamten ELD ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Für jedes einzelne Ökosystem, wird basierend auf den drei definierten Wirkungsindikatoren GWP, EP und AP jeweils der spezifische ELD_{w,n} berechnet. Für jedes Ökosystem werden damit drei Flächenbedarfe ermittelt. Um eine doppelte Anrechnung zu vermeiden, wird das Maximum aus den drei einzelnen Flächenbedarfen je Ökosystem bestimmt. Das Ergebnis daraus ist ein spezifischer Flächenbedarf für jedes einzelne Ökosystem. Der gesamte ELD_{Ges} stellt die Summe aller einzelnen Bedarfe dar.

Schritt 2: Analyse der jeweiligen Maxima je Ökosystem



Ergebnis: Gesamter ökologischer Flächenbedarf, welcher sich aus den einzelnen Maxima je Ökosystem zusammensetzt, gemäß Formel 6.12

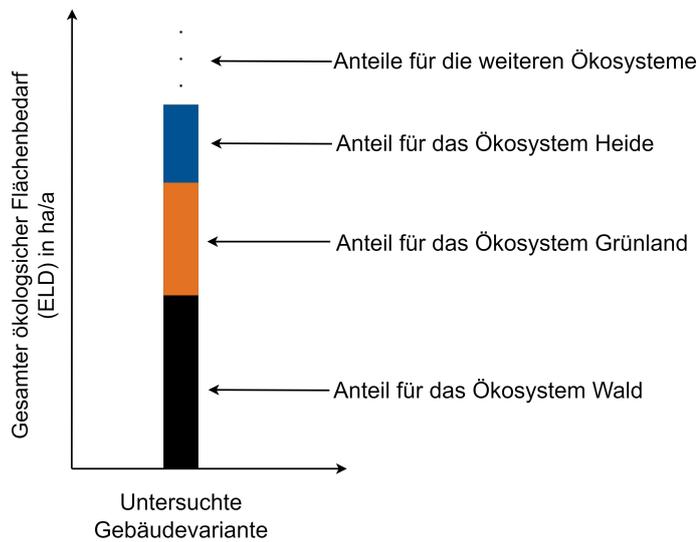


Abbildung 6.8 Darstellung der Ermittlung des gesamten ökologischen Flächenbedarfs (ELD) basierend auf den einzelnen Maxima je Ökosystem (eigene Darstellung)

Der gesamte ökologische Flächenbedarf ergibt sich gemäß Formel 6.12.

$$ELD_{Ges} = \sum Max(ELD_{w,n}) \quad (6.12)$$

ELD_{Ges} : Gesamter ökologischer Flächenbedarf ELD [ha/a]

$ELD_{w,n}$: Ökologischer Flächenbedarf ELD abhängig von w und n [ha/a]

w : Spezifischer Wirkungsindikator (GWP, AP oder EP)

n : Ökosystemtyp gemäß Tabelle 6.1

6.5 Lebenszyklusbasierte parametrische Optimierung

6.5.1 Implementierung in ein Gebäudesimulationsprogramm

Die lebenszyklusbasierte parametrische Optimierung des ELD erfolgt mithilfe des Softwaretools IDA ICE. Die Implementierung aller relevanten Berechnungen zur LCA und zum ELD erfolgt in IDA ICE mittels Graphical Scripting (GraScrp). Mithilfe von GraScrp können mathematische Sachverhalte grafisch in Objekten und Elementen (z. B. Berechnung der LCA für die Außenwand) dargestellt und verknüpft werden. Die einzelnen Parameter der Berechnung werden dabei mit definierten Knoten respektive mathematischen Operatoren verbunden. Der Ablauf und die Logik der einzelnen Berechnungen sind einfach nachvollziehbar. Für die komplette Berechnung müssen abschließend alle Elemente verbunden werden. Somit ist es möglich, in IDA ICE die Berechnungen zur LCA und des ELD zu implementieren. Dies ist notwendig, da die Zielfunktion für die parametrische Optimierung die Quantifizierung des ELD darstellt. Die implementierten Objekte sind schematisch in folgender Abbildung 6.9 dargestellt.

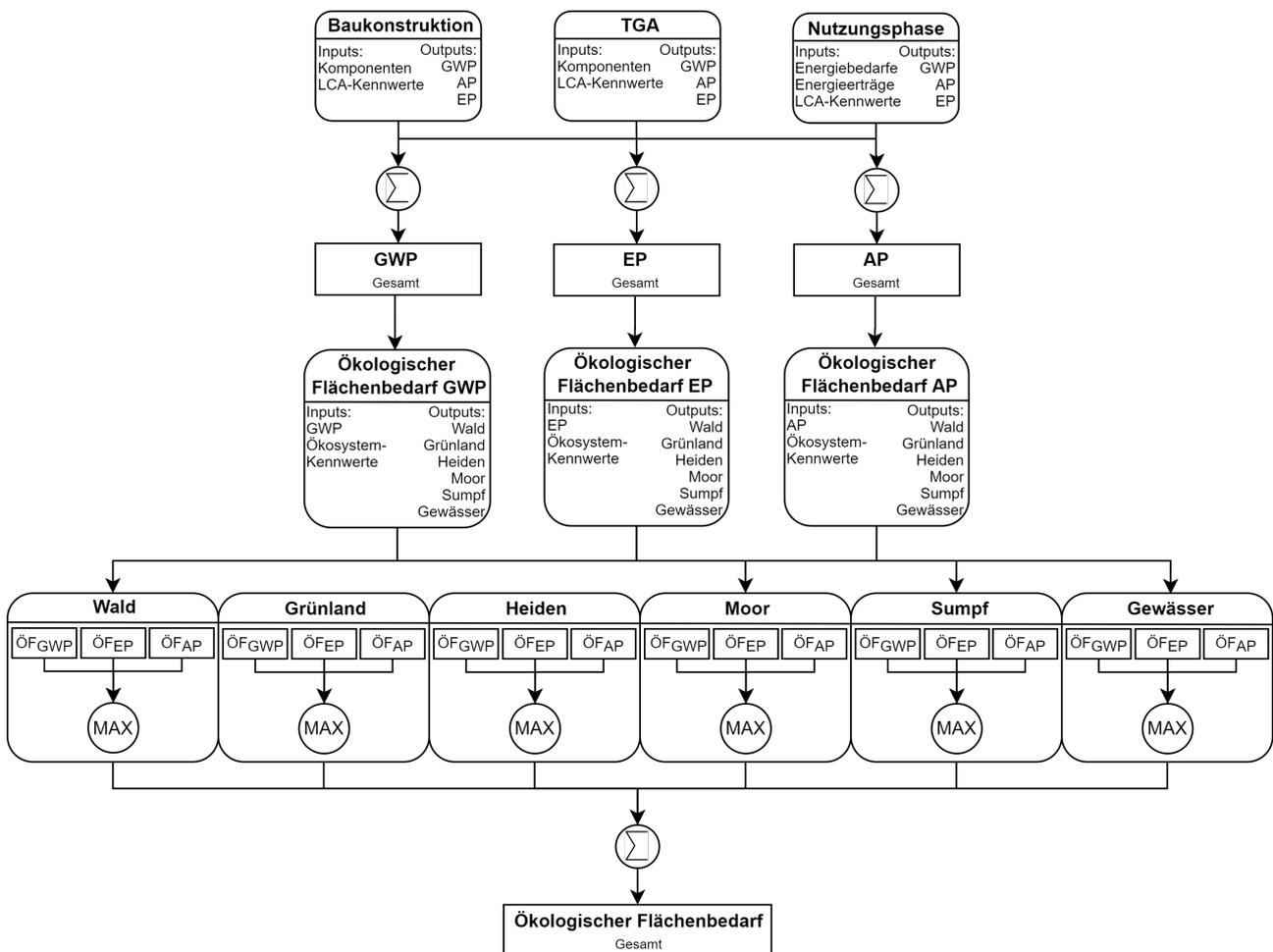


Abbildung 6.9 Schematische Darstellung der Abfolge und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Objekten und mathematischen Operatoren des Graphical Scriptings in IDA ICE (eigene Darstellung)

Grundlage der Implementierung sind die drei Objekte der LCA zur Baukonstruktion (BK), Technische Gebäudeausrüstung (TGA) und Nutzungsphase. Als Inputs benötigen diese Objekte alle notwendigen Parameter zur Berechnung der definierten Wirkungskategorien. Hierzu zählen die bilanzierten Komponenten LCA-Kennwerte, Energiebedarfe und -erträge. Als Outputs liefern die drei Objekte das Treibhauspotenzial

(GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP). Die mathematischen Grundlagen zur Berechnung der LCA sind in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Im nächsten Schritt werden die Summen aus den jeweiligen Wirkungskategorien gebildet, um Gesamtwerte für das Gebäude zu erhalten. Dabei wird die Summe für das GWP der BK, TGA und Nutzungsphase gebildet (äquivalent auch für AP und EP). Die Gesamtwerte bilden die für die weitere Berechnung des ELD notwendigen Inputs. Im dritten Schritt werden die ökologischen Flächenbedarfe für das GWP, EP und AP für die definierten Ökosysteme anhand der LCA Ergebnisse und den ökosystem-spezifischen Kennwerten ermittelt. Der mathematische Sachverhalt hierzu ist in Kapitel 6.4 beschrieben. Output aus dem dritten Schritt stellen für jedes Ökosystem die drei ökologischen Flächenbedarfe ELD_{GWP} , ELD_{EP} und ELD_{AP} dar. Um eine mehrfache Verrechnung des Flächenbedarfs zu vermeiden, wird aus den drei ermittelten einzelnen Flächenbedarfe das jeweilige Maximum für die weitere Berechnung verwendet. Der gesamte ökologische Flächenbedarf ELD_{Ges} ergibt sich im letzten Schritt aus der Summe aller einzelnen Maxima.

Wie die einzelnen Objekte aufgebaut sind, zeigt Abbildung 6.10 auf Seite 82 schematisch für die LCA der BK. Das Objekt der LCA zur BK ist untergliedert in verschiedene Elemente, z. B. Außenwand, Bodenplatte etc. In jedem Element wird für die jeweiligen Komponenten der BK die LCA berechnet. Die notwendigen Inputs, wie z. B. Fläche des Bauteils, Bauteilschichten und Materialdicken, bezieht das Element direkt aus dem Gebäudemodell in IDA ICE.

Die ökologischen Kennwerte zur Berechnung werden basierend auf der verwendeten Datenbank in IDA ICE implementiert. Die Summe der einzelnen Wirkungsindikatoren aus den einzelnen Elementen bildet abschließend die Gesamtsumme für das Objekt der BK. In Abbildung 6.11 auf Seite 83 ist schematisch das Objekt der TGA und in Abbildung 6.12 auf Seite 84 das Objekt des Energiebedarfs in der Nutzungsphase dargestellt.

Gebäudemodell IDA ICE

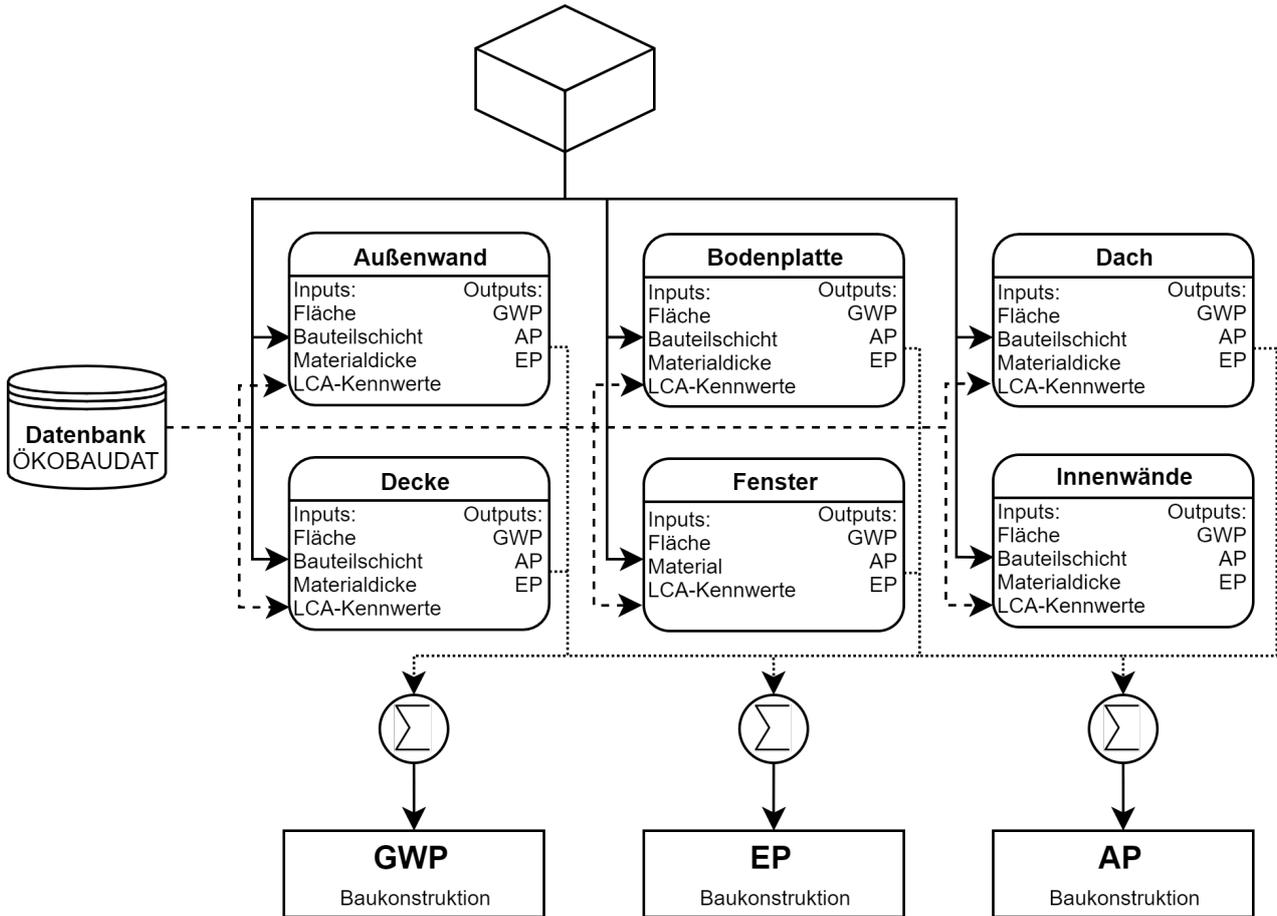


Abbildung 6.10 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen im Objekt der Baukonstruktion (BK); schwarze Linie = Input aus Gebäudemodell, gestrichelte Linie = Input aus Datenbank ÖKOBAUDAT, gepunktete Linie = Output aus dem Element für den jeweiligen Wirkungsindikator (eigene Darstellung)

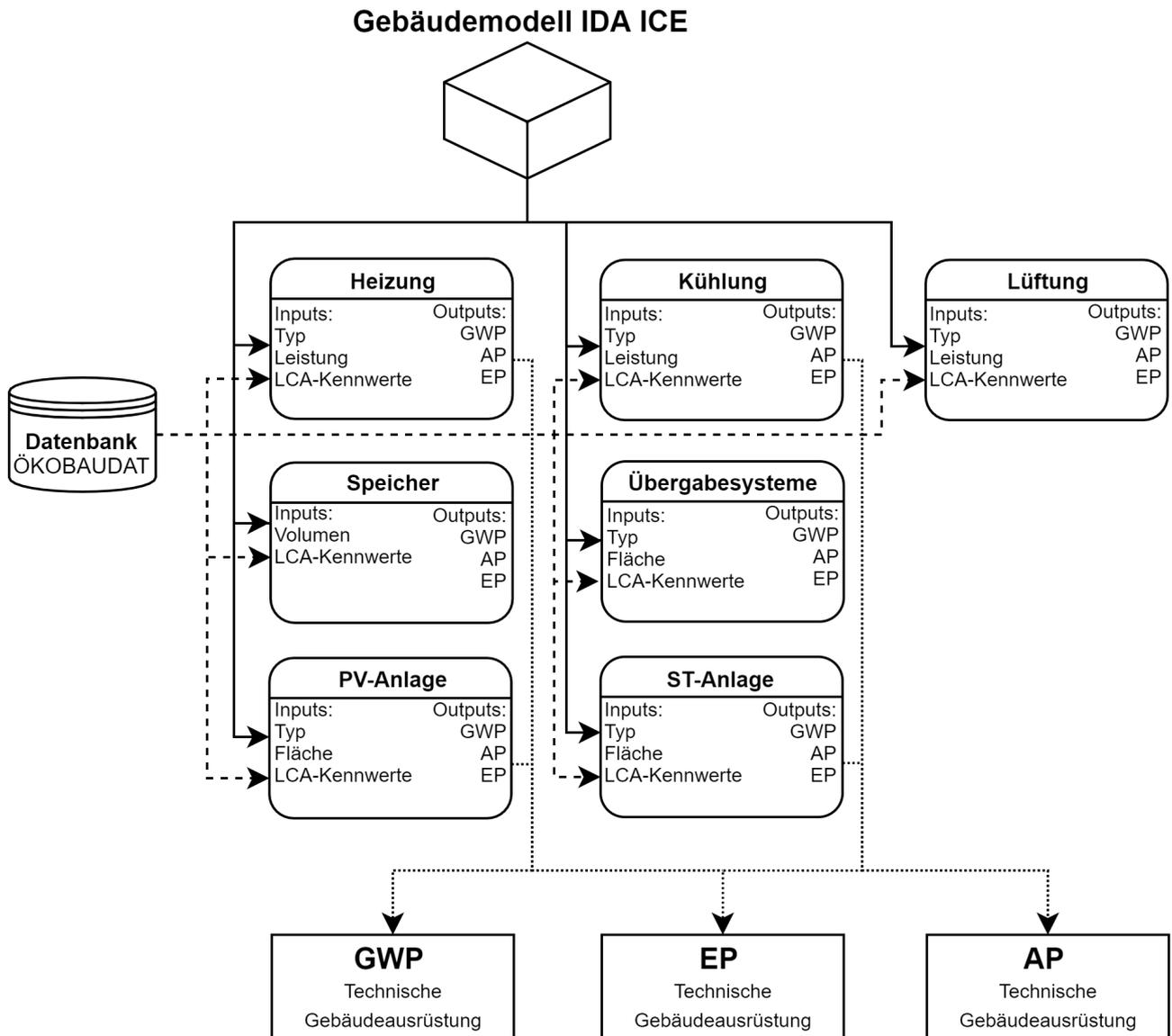


Abbildung 6.11 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen im Objekt der Technischen Gebäudeausrüstung TGA; schwarze Linie = Input aus Gebäudemodell, gestrichelte Linie = Input aus Datenbank ÖKOBAUDAT, gepunktete Linie = Output aus dem Element für den jeweiligen Wirkungsindikator (eigene Darstellung)

Das Element der Technischen Gebäudeausrüstung (siehe Abbildung 6.11) beinhaltet die Berechnungen zum Heiz-, Kühl- und Lüftungssystem, der Photovoltaik- (PV) und Solarthermieanlage (ST). Des Weiteren werden die Komponenten des Warm- und Kaltwasserspeichers und das Übergabesystem berechnet. Die notwendigen Inputs, wie z. B. die Leistungskennwerte, Volumen und Fläche werden aus dem Gebäudemodell bezogen. Angaben zum Typ der jeweiligen Komponente werden manuell mittels des jeweiligen Ökobilanz-Datensatzes ergänzt.

Gebäudemodell IDA ICE

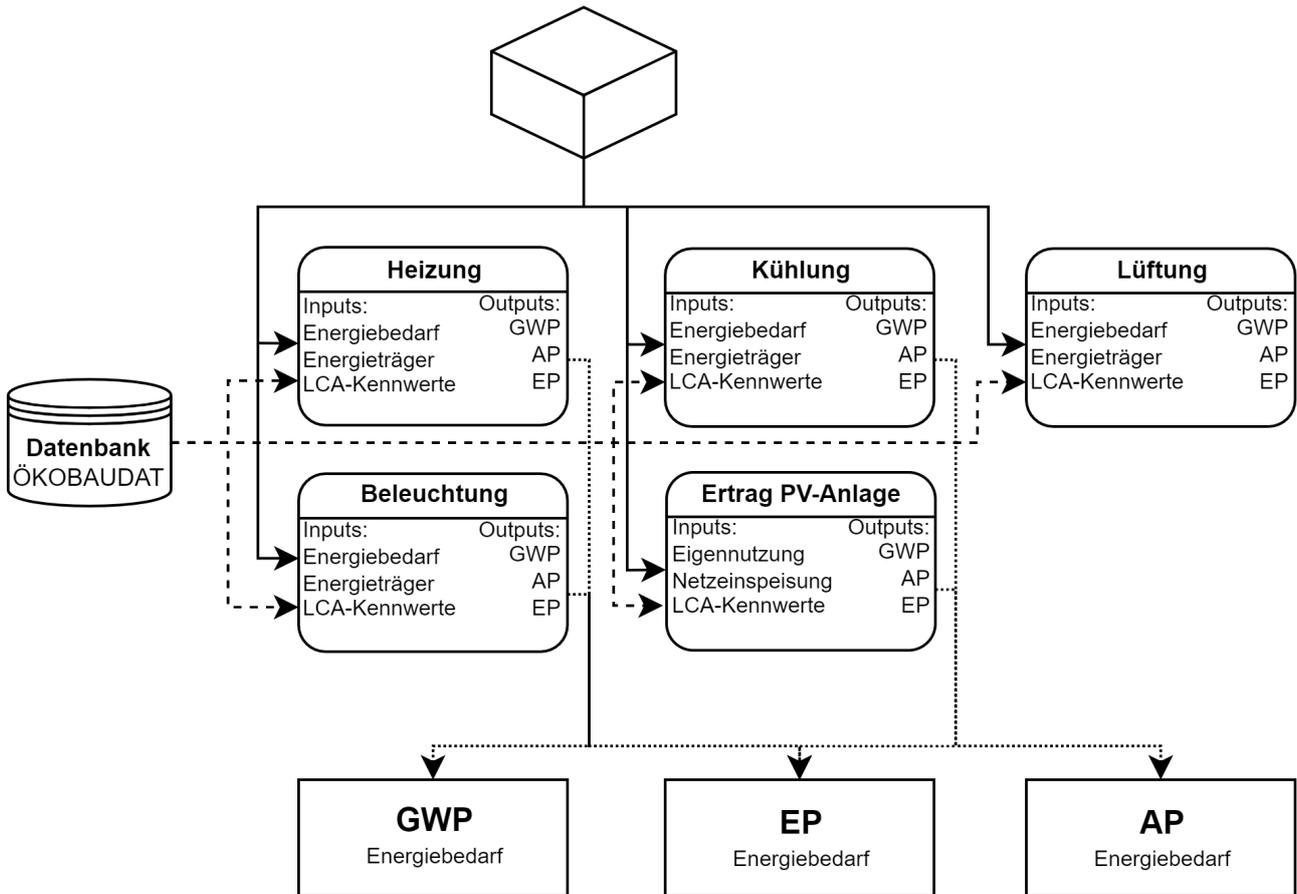


Abbildung 6.12 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen im Objekt der Nutzungsphase; schwarze Linie = Input aus Gebäudemodell, gestrichelte Linie = Input aus Datenbank ÖKOBAUDAT, gepunktete Linie = Output aus dem Element für den jeweiligen Wirkungsindikator (eigene Darstellung)

Das Element der Nutzungsphase (siehe Abbildung 6.12) ermittelt auf Basis der simulierten Energiebedarfe die Umweltwirkungen. Simuliert werden die einzelnen Energiebedarfe für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung. Des Weiteren wird, sofern eine PV-Anlage vorhanden ist, der überschüssige Ertrag des am Standort erzeugten Stroms ausgegeben.

6.5.2 Parametrische Optimierung

Das Vorgehen der parametrischen Optimierung ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Eine notwendige Bedingung zur Durchführung der parametrischen Optimierung stellt die Erstellung eines geeigneten Simulationsmodells dar. Das Simulationsmodell ist maßgeblich von dem zu untersuchenden Gebäude abhängig. Für das Gebäude muss im ersten Schritt ein Gebäudemodell mit den geometrischen Gebäudedaten und der BK erstellt werden. Dieses Gebäudemodell wird im nächsten Schritt durch Informationen zum Standort, den Wetterdaten, TGA und der Regelung und Steuerung (z. B. für die Regelung der Heizung oder Fensteröffnung) angereichert. In das Simulationsmodell werden anschließend die Berechnungen zur LCA und ELD mittels GraScrp in IDA ICE implementiert. Basierend auf diesen Informationen wird die Zielfunktion für die Optimierung definiert. Zum Start der Optimierung werden alle zu variierenden Parameter inkl. der jeweiligen minimalen und maximalen Werte in IDA ICE definiert. Nachdem alle Parameter definiert sind, greift das in IDA ICE implementierte Tool Generic Optimization Program (GenOpt) auf die definierten Variablen zu und übergibt die Zielfunktion mit den Parametern an die definierten Optimierungsalgorithmen.

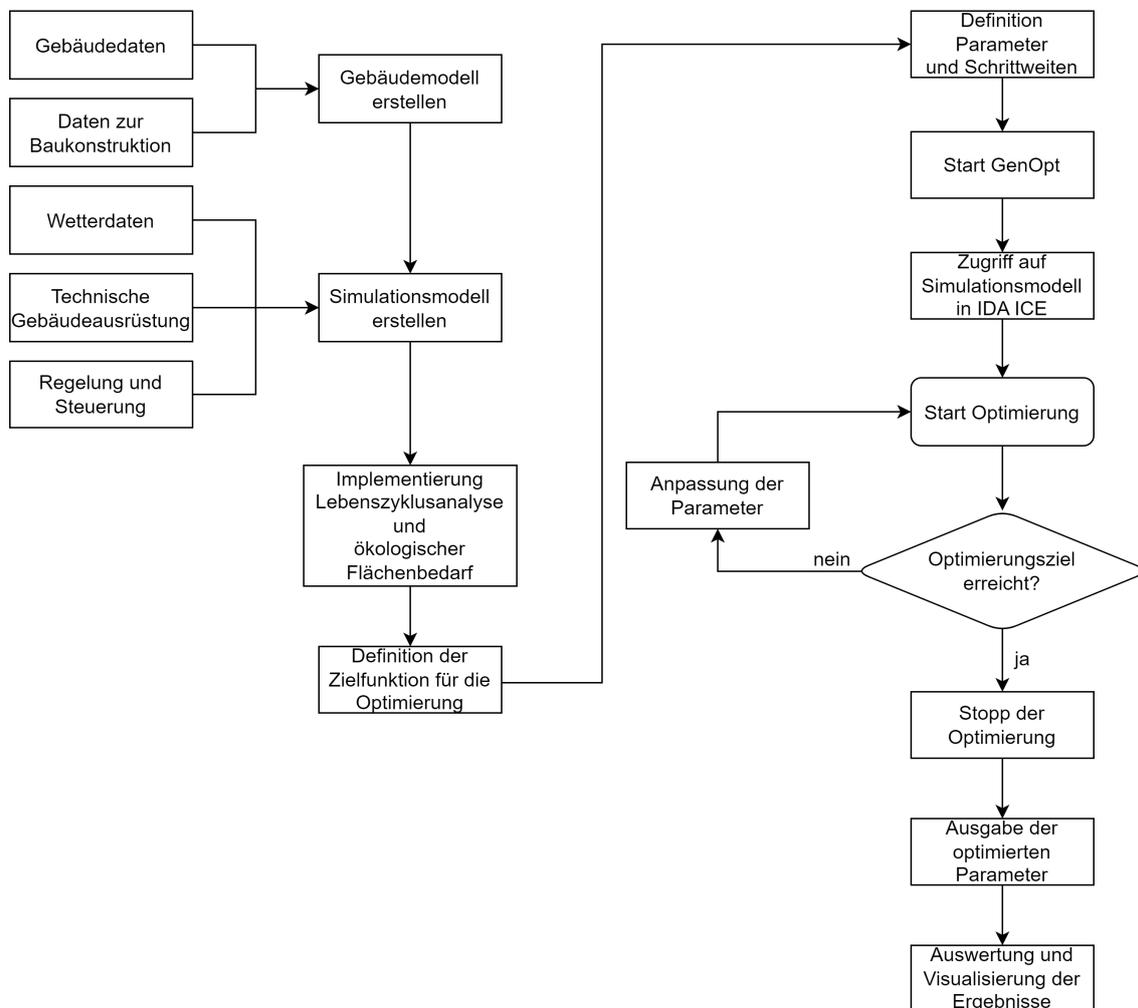


Abbildung 6.13 Übersicht über die einzelnen methodischen Schritte (eigene Darstellung)

Die Optimierung läuft iterativ so lange, bis die Optimierungsverfahren nach dem erfolgreichen Identifizieren des Optimums abschalten. Die Optimierung wird gestoppt und die einzelnen Werte aller optimierten Parameter werden ausgegeben. Den letzten Schritt stellt die Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse dar. Ein grundsätzliches Problem bei der Identifikation des Optimums der Zielfunktion stellt bei komplexeren mathematischen Funktionen die Tatsache dar, dass es mehrere Optima geben kann. In Abbildung 6.14 ist eine mathematische Funktion mit mehreren lokalen und globalen Maxima und Minima dargestellt. Dadurch, dass manche Optimierungsverfahren (deterministische Optimierungsverfahren) einen spezifischen definierten Startpunkt benötigen, besteht die Möglichkeit, dass der Optimierungsalgorithmus nur ein lokales Minimum findet. In Bezug auf die parametrische Optimierung und die Wahl der Optimierungsalgorithmen baut diese Arbeit auf der Dissertation von Kierdorf auf [208]. Kierdorf analysierte mehrere stochastische und deterministische Optimierungsverfahren und deren Anwendung in der thermischen Gebäudesimulation. Bei stochastischen Optimierungsverfahren werden mehrere Simulationen parallel durchgeführt und deren Lösung wird miteinander verglichen. Die einzelnen Start-Simulationen werden dabei über den gesamten Suchraum zufällig verteilt. Dem gegenüber ist bei deterministischen Optimierungsverfahren ein spezifischer Startpunkt erforderlich. Er zeigt auf, dass die Kombination aus stochastischen und deterministischen Optimierungsverfahren eine vielversprechende Kombination zur Identifikation des globalen Minimums darstellt [208]. Dies wird auch durch weitere Studien bestätigt, z. B. [209].

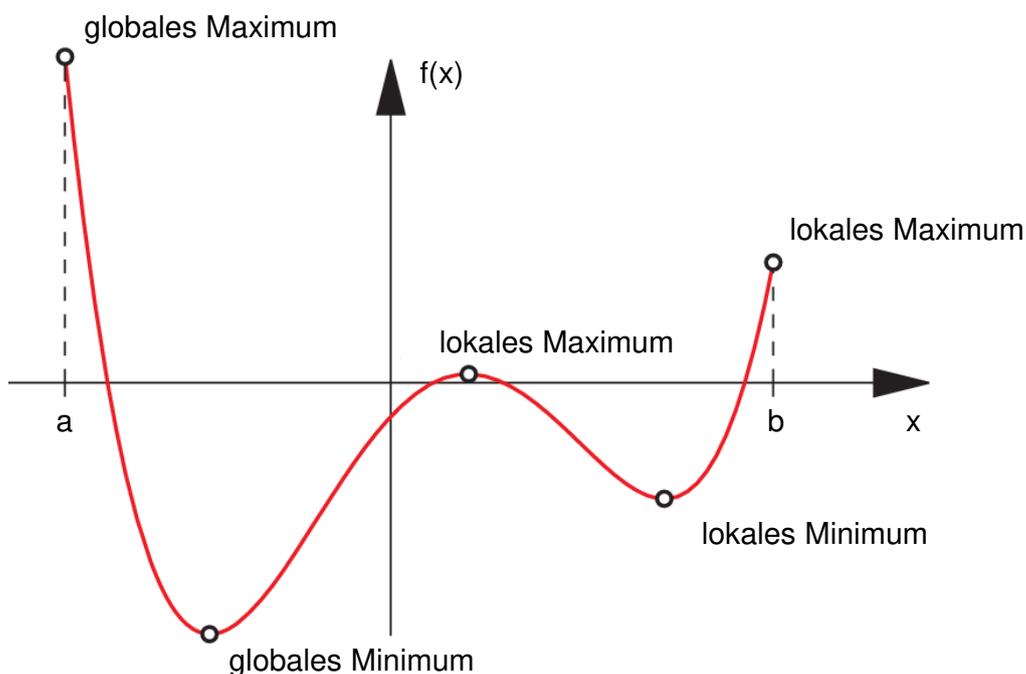


Abbildung 6.14 Darstellung einer mathematischen Funktion mit lokalen und globalen Minima und Maxima (Quelle: [210])

In Bezug auf die Optimierung werden zwei verschiedene Optimierungsalgorithmen verwendet: die Particle Swarm Optimization (PSO) (stochastisches Optimierungsverfahren) [211] und das Optimierungsverfahren nach Hooke-Jeeves (HJ) (deterministische Optimierungsverfahren) [212]. Nachfolgend werden beide Optimierungsverfahren beschrieben und deren Vorgehen erläutert.

Particle Swarm Optimization (PSO)

Die Methodik der PSO wurde im Jahre 1995 von Kennedy und Eberhart entwickelt [211]. Die PSO ist ein von der Natur inspiriertes Optimierungsverfahren und gehört daher zur Klasse der populationsbasierten evolutionären Algorithmen. Als Vorbild aus der Natur wurde das Schwarmverhalten von Vögeln und Fischen herangezogen. Dabei basiert die Idee des Algorithmus darauf, dass der Schwarm aus mehreren einzelnen Partikeln besteht. Bewegen sich die einzelnen Partikel durch den Suchraum, so wird davon ausgegangen, dass eine gute Lösung gefunden wird. Jeder Partikel wiederum stellt grundsätzlich eine potenzielle Lösung der zu lösenden Zielfunktion dar. Die Partikel sind abhängig von Parametern der Zielfunktion. In Bezug auf den Gebäudekontext stellt ein Partikel (eine Lösung beziehungsweise ein Ergebnis) unter anderem der Energiebedarf des Gebäudes dar. Der Energiebedarf des Gebäudes ist wiederum von diversen Parametern, z. B. Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand oder Fensterflächenanteil abhängig. Die Herangehensweise des PSO zur Lösung der Zielfunktion ist, dass im ersten Schritt den definierten Parametern zufällige Werte zugeteilt werden. Somit entstehen über den gesamten Suchraum verteilt zufällige Partikel und Lösungen. Schematisch ist dieser erste Zustand in Abbildung 6.15 dargestellt. Die schwarzen Punkte stellen hierbei zufällige Lösungen der Zielfunktion dar. Im zweiten Schritt werden die einzelnen gefundenen Lösungen verglichen und hinsichtlich der Zielfunktion bewertet.

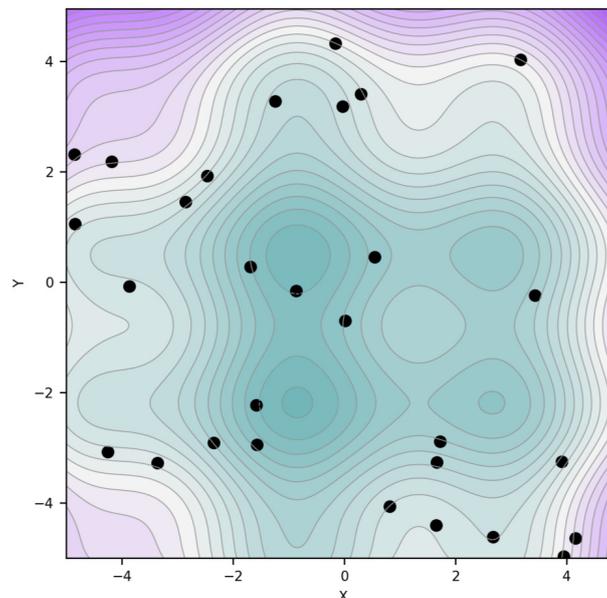


Abbildung 6.15 Schematische Darstellung der zufällig initiierten Partikel (Lösungen) im gesamten Suchraum (Quelle: [213])

Durch die stetige Variation und Änderung der definierten Parameter wird für die Zielfunktion ein Optimum gesucht. Dies geschieht dadurch, dass jeder einzelnen Partikel in Richtung seiner vorherigen besten Position (persönliche Bestleistung) und in Richtung der besten Lösung der Gruppe (globale Bestleistung) beschleunigt wird. Das heißt, jeder Partikel verfügt dabei über einen Geschwindigkeitsvektor. Schematisch ist dies in Abbildung 6.16 auf Seite 88 dargestellt.

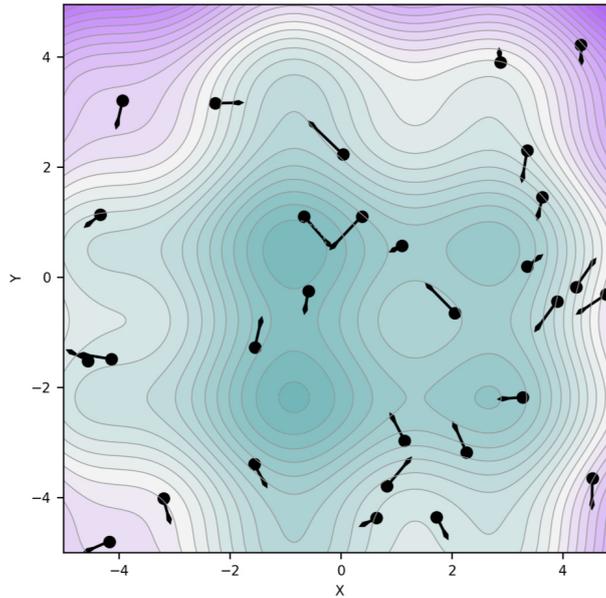


Abbildung 6.16 Schematische Darstellung der Partikel (Lösungen) und deren Geschwindigkeits- und Richtungsvektoren (Quelle: [213])

Die Beschleunigung der einzelnen Partikel führt letztlich dazu, dass sich die einzelnen Partikel dem globalen Optimum nähern. Dies zeigt Abbildung 6.17. Hierbei ist ersichtlich, dass die Partikel nicht mehr über den gesamten Suchraum verteilt sind, sondern dass sich diese überwiegend in einem Bereich befinden.

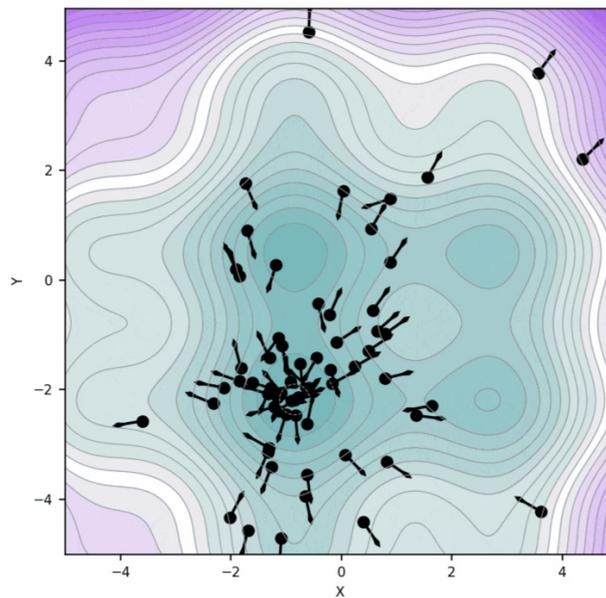


Abbildung 6.17 Schematische Darstellung der einzelnen Partikel (Lösungen), die sich um das globale Optimum anordnen (Quelle: [213])

Dieses grundsätzliche Vorgehen wird so lange wiederholt und durchgeführt, bis ein globales Optimum gefunden wurde. Da der Optimierungsverlauf kein festes Schema aufweist und auch die erste Verteilung der Partikel zufällig erfolgt, ist der Optimierungsverlauf nicht reproduzierbar und bei jedem neuen Start verschieden.

Hooke-Jeeves (HJ)

In Ergänzung zur PSO wird als zweites Optimierungsverfahren von Hooke-Jeeves (HJ) verwendet. Das HJ-Verfahren funktioniert nach zwei grundlegenden Prinzipien: Tasten und Voranschreiten. Beim Tasten ändert der Algorithmus einen der definierten Parameter um eine feste Tastschrittweite in jede mögliche Richtung. Eine potenzielle Änderung des Algorithmus kann die Änderung der Dicke der Wärmedämmung von Ausgangspunkt $d=20$ cm auf $d=24$ cm und $d=16$ cm darstellen. Die Tastschrittweite sind in diesem Fall $d=4$ cm. Nachdem der Tastschritt durchgeführt wurde, analysiert der Algorithmus das Ergebnis der Zielfunktion für beide Fälle. Dabei analysiert und identifiziert der Algorithmus, ob einer der Tastschritte zu einer Optimierung der Zielfunktion geführt hat. Auf Basis dieser Analyse gibt es zwei Optionen. Einer der Tastschritte führt zu einer Optimierung, dann schreitet der Algorithmus voran und passt den Parameter basierend auf dieser Erkenntnis für den nächsten Tastschritt entsprechend an. Der identifizierte Tastschritt dient dann als neuer Ausgangspunkt für das nächste Tasten. Führt keiner der Tastschritte zu einer Optimierung der Zielfunktion, dann ist die Tastschrittweite zu groß und wird im nächsten Schritt angepasst, etwa Reduktion der Tastschrittweite der Wärmedämmung von 4 cm auf 2 cm. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass für jeden einzelnen Parameter sehr genau das Optimum identifiziert und numerisch gelöst werden kann, was die PSO nicht kann. Der Nachteil ist allerdings, dass dieses Verfahren und das Variieren jedes einzelnen Parameters sehr aufwendig ist und damit hohe Rechenzeiten verursacht.

Die Abbildung 6.18 auf Seite 90 zeigt beispielhaft die durchgeführten Tastschritte, ausgehend vom Ausgangspunkt B_0 . Das erfolgreiche Verändern eines Parameters und die Verbesserung im Tastschritt zeigt sich anhand des Punkts (2) bzw. (3). Hier wurden zwei erfolgreiche Tastschritte durchgeführt, was zu einem neuen Ausgangspunkt B_1 führt. Das Erkennen eines erfolgreichen Tastschritts, dargestellt als weißer Kreis oder das Verschlechtern, dargestellt durch ein Kreuz, führt nach mehreren Tastschritten dazu, dass der Parameter zum Optimum voranschreitet. Das Optimum ist in diesem Fall dargestellt als der Punkt B_7 . Hierbei zeigt sich auch, dass in den letzten Schritten die Tastschrittweite systematisch reduziert wurde.

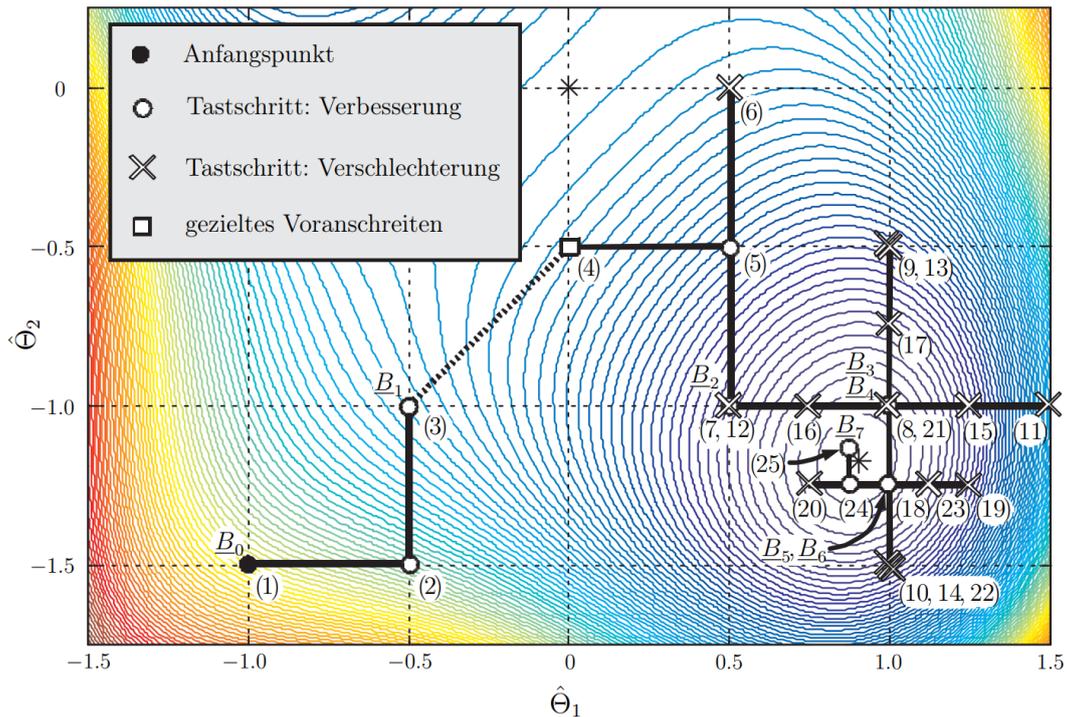


Abbildung 6.18 Darstellung einer Optimierung mit dem Hooke-Jeeves (HJ)-Verfahren: das Optimierungsverfahren tastet dabei in kleinen Schritten in einer definierten Richtung voran und untersucht, ob der Testschritt hinsichtlich der definierten Zielfunktion zu einer Optimierung geführt hat. Auf einen erfolgreichen Testschritt folgt das Voranschreiten (Quelle: [214])

6.6 Kurzzusammenfassung

Die in dieser Dissertation entwickelte und dargestellte Methode ermöglicht es, auf Basis von Lebenszyklusanalysen (LCA) den natürlichen Regenerationsfähigkeiten und ökologischen Belastungsgrenzen (CL) den emissionsbezogenen ökologischen Flächenbedarf (ELD) von Gebäuden zu ermitteln. Dabei werden die Wirkungsindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) berücksichtigt. Die beschriebene Methode verbindet zwei unterschiedliche Bewertungsmethoden, nämlich das Ecological Modelling und das Building Performance Modelling. Der entwickelte ELD stellt die gesamte Fläche an natürlichen Ökosystemen dar, die zur Bindung der Gebäudeemissionen notwendig sind. Für das ökologische Bauen dient dieser Indikator zur anschaulichen Darstellung der Ergebnisse von LCAs und dem Einfluss von Gebäuden auf Ökosysteme. Diese Art der Darstellung kann nach aktuellem Stand der Forschung als neuartig bezeichnet werden, wobei folgende Mehrwerte generiert werden:

- Die Lebenszyklusanalyse (LCA) wird methodisch um einen End-Point Indikator erweitert. Hierdurch können bestehende Wirkungsindikatoren in einen konkreten Kontext gesetzt werden (ökologischer Flächenbedarf (ELD))
- Der ELD ermöglicht die Interpretation und eine verständlichere Darstellung von Ergebnissen einer LCA
- Anhand der Ergebnisse zum ELD können Maßnahmen zur ökologischen Kompensation abgeleitet werden, um gezielte Umweltentlastungspotenziale zu schaffen und um ökologisch positive Gebäude umzusetzen

Die in dieser Dissertation entwickelte Methode wird in ein Gebäudesimulationsprogramm (IDA ICE) mittels Graphical Scripting (GraScrp) integriert. Der Funktionsumfang von IDA ICE hinsichtlich der energetischen und thermischen Simulation von Gebäuden wird dadurch um die LCA und die Berechnung des ELD erweitert. Für die lebenszyklusbasierte Optimierung werden zwei verschiedene Optimierungsverfahren verwendet. Zum einen das Verfahren der Particle Swarm Optimization (PSO) und das Hooke-Jeeves Verfahren (HJ). Die Kombination von stochastischen und deterministischen Optimierungsverfahren stellt hierbei eine vielversprechende Kombination zur Optimierung von Gebäudeparametern dar.

7 Anwendung anhand eines Fallbeispiels

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Quantifizierung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) wird in diesem Kapitel anhand eines Fallbeispiels angewendet. Das Fallbeispiel dient im Rahmen dieser Untersuchung dazu, eine praxisnahe Anwendung des ELD zu demonstrieren. Als Fallbeispiel dient ein im Jahr 2016 errichtetes Bürogebäude in Regensburg. Beschrieben sind die Eigenschaften des Fallbeispiels in Kapitel 7.1. In Kapitel 7.2 sind die Grundlagen zum thermischen Gebäudemodell beschrieben. Im ersten Schritt wird das Fallbeispiel anhand der folgenden zwei Vergleichsvarianten analysiert und der ELD ermittelt (siehe Kapitel 7.3):

- v01 - Referenzgebäude gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG)
- v02 - Ausführungsvariante des existierenden Gebäudes

Im zweiten Schritt wird die Sensitivität ausgewählter Gebäudeparameter auf den ELD analysiert und Festlegungen und Definitionen für die parametrische Optimierung getroffen (siehe Kapitel 7.4). Basierend auf den Festlegungen wird anschließend die parametrische Optimierung durchgeführt und die Ergebnisse anhand der Vergleichsvarianten eingeordnet. Zur Einordnung und zur Vergleichbarkeit dient der ELD [ha/a] und der spezifische ökologische Flächenbedarf ELD" [m^2_{ELD}/m^2_{NGFA}] (siehe Kapitel 7.5).

Anschließend wird der Betrachtungshorizont über die Gebäudeebene hinaus erweitert (siehe Kapitel 7.6). Hierbei werden die baulichen Maßnahmen, wie beispielsweise ein Parkplatz oder die Umsetzung von natürlichen und naturnahen Gebiete und Flächen auf dem Grundstück in die Lebenszyklusanalyse (LCA) inkludiert und deren Einfluss auf den ELD ermittelt und dargestellt. Des Weiteren wird aufgezeigt, welche Flächen notwendig sind, um den lebenszyklusbasierten Primärenergiebedarf und den Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen zu decken.

Basierend auf den Ergebnissen werden anschließend im Kapitel 7.7 die Erkenntnisse zusammengefasst und die Bedeutung für das nachhaltige Bauen abgeleitet.

7.1 Beschreibung des Fallbeispiels

Für die Anwendung der entwickelten Methode wird ein im Jahr 2016 errichtetes Bürogebäude als Fallbeispiel verwendet (siehe Abbildung 7.1 auf Seite 94). Das Gebäude ist nicht unterkellert und umfasst neben dem Erdgeschoss zwei Obergeschosse. Die Bodenplatten, Außenwände, Fenster und das Dach bilden die thermische Gebäudehülle. Das Fallbeispiel war Bestandteil des Forschungsprojekts „Tausendpfund Ökobilanz & Monitoring“ am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München (TUM). Die Forschungsergebnisse sind in der Publikationsreihe *INNOVATION* des Bayerischen Bauindustrieverbands e.V. (BBIV) veröffentlicht [215].



Abbildung 7.1 Außenansicht des Fallbeispiels (Fotoquelle: © Bauer | bauerwerner.com)

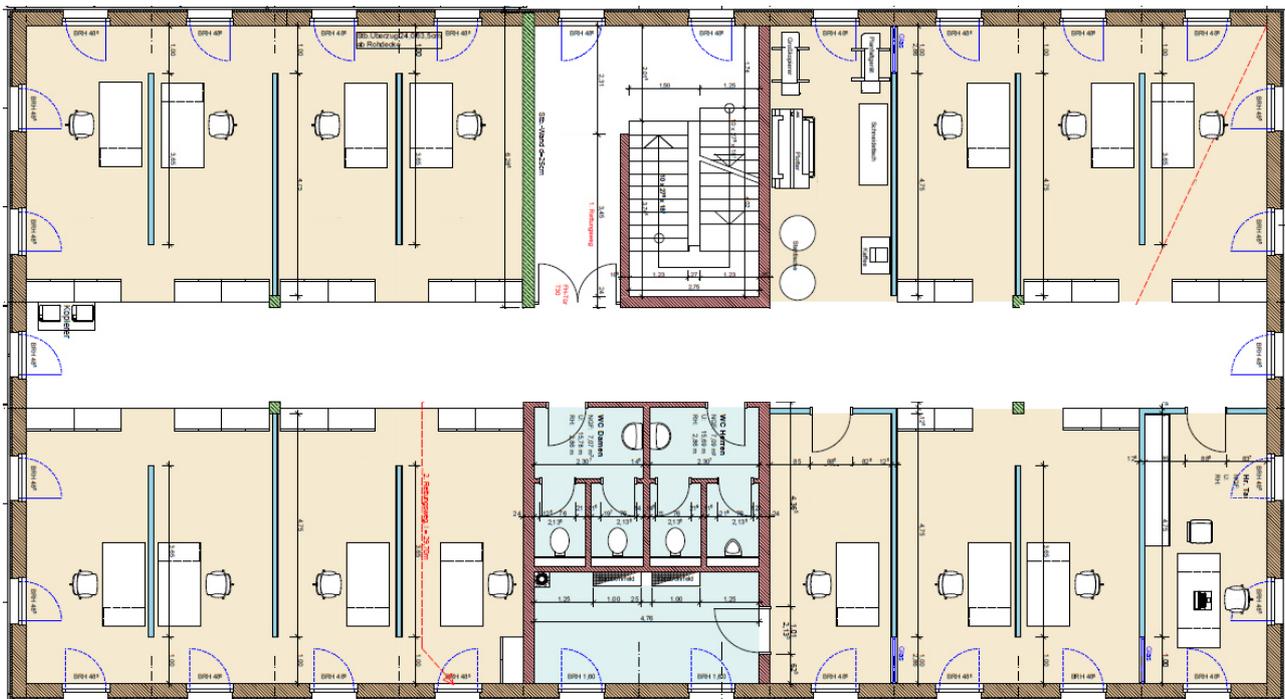


Abbildung 7.2 Exemplarischer Grundriss des ersten Obergeschosses des Fallbeispiels; dargestellt sind die Verkehrsflächen (in weiß), Sanitärflächen (in blau) und Büros (in orange)

Exemplarisch ist in Abbildung 7.2 auf Seite 94 der Grundriss des Gebäudes dargestellt. Das Gebäude umfasst vier unterschiedliche Zonen: Büros, Aufenthaltsräume, Verkehrsflächen und Sanitärräume. Alle Zonen des Gebäudes werden als auf normale Temperaturen ($> 21 \text{ }^\circ\text{C}$) beheizte Bereiche angesehen. Für das Fallbeispiel ergeben sich zusammenfassend folgende Kenngrößen:

- Fläche der thermischen Gebäudehülle $A = 1.407 \text{ m}^2$
- Bruttovolumen $V_e = 4.246 \text{ m}^3$
- Luftvolumen $V = 3.397 \text{ m}^3$
- Nettogrundfläche $A_{\text{NGF}} = 1.097 \text{ m}^2$
- Fensterflächenanteil ca. 33 %
- A/V_e -Verhältnis $A/V_e = 0,41 \text{ m}^{-1}$

Basierend auf den Gebäudeplänen und den Nutzungsprofilen wird für die thermische Gebäudesimulation ein Mehrzonen-Modell mit insgesamt 19 Zonen erstellt.

7.2 Grundlagen und Randbedingungen

7.2.1 Randbedingungen der Lebenszyklusanalyse

Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre und dabei werden folgende Lebenszyklusphasen betrachtet:

- A1: Rohstoffbeschaffung
- A2: Transport
- A3: Produktion
- B4: Austausch
- B6: Energieverbrauch im Betrieb
- C3: Abfallbehandlung
- C4: Beseitigung

Das Recyclingpotenzial (Modul D) wird im Folgenden informationshalber dargestellt, aber nicht in der Bilanzierung berücksichtigt, da es sich hierbei um Potenziale für die Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling außerhalb der Systemgrenze handelt.

7.2.2 Interne Lasten

Für die internen Lasten sind im Simulationsmodell drei verschiedene Lasten definiert (Anzahl anwesender Personen, elektrische Geräte und Beleuchtung). Durch die Anwesenheit und Aktivität der Nutzenden und das Betreiben elektrischer Geräte wird Wärme abgegeben, die einen Einfluss auf das thermische Raumklima in der Zone haben. Um möglichst realistische Ergebnisse hinsichtlich der Raumlufttemperaturen und des Energiebedarfs zu erhalten, müssen die internen Lasten möglichst realitätsnah abgebildet werden. Für das Fallbeispiel sind im Folgenden die angesetzten Grundlagen und Randbedingungen der internen Lasten aufgelistet.

Personen

- Aktivitätsgrad 1 met (entspricht sitzender Tätigkeit im Büro)
- Bekleidungsgrad $0,85 \pm 0,25$ clo
- Anzahl 38 Personen (80 % Belegung)
- Anwesenheit Montag bis Freitag
- Anwesenheitsdauer 07:00 bis 17:00 Uhr

Elektrische Geräte

- Leistung pro Gerät 75 W
- Anzahl 38 Stück
- Laufzeit gekoppelt an Personen

Beleuchtung

- Leuchten Typ LED
- Leistung 5 W/m^2
- Setpoints Beleuchtungsstärke 300/500 lx
- Zeitplan gekoppelt an Personen

7.2.3 Setpoints für die Steuerung und Regelung

Heizung und Kühlung

Die Steuerung der Heizung und Kühlung erfolgt gemäß DIN EN 16798 „Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6“ [216] und der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.5 (Raumtemperatur) [217]. Für die Heizperiode wird für Büros und ähnlich genutzte Räume basierend auf der höchsten Kategorie I eine empfohlene Raumtemperatur von 21 bis 23 °C angegeben. Für die Kühlperiode wird ein Temperaturbereich von < 26 °C angegeben. Die Setpoints für Heizung und Kühlung sind in folgender Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1 Randbedingungen der Gebäudenutzung für Heizung und Kühlung

Bezeichnung	Setpoint
Soll-Temperatur Heizung	22 °C
Soll-Temperatur Kühlung	25 °C

Fensterlüftung

Die Kontrollstrategie für das Fensteröffnungsverhalten der Personen wird anhand von mehreren Bedingungen gesteuert: zum einen gemäß den zuvor erläuterten Soll-Raumtemperaturen und zum anderen gemäß der CO₂-Konzentration in der Zone. Der Setpoint für die CO₂-Konzentration basiert auf der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6 (Lüftung) [218]. In der ASR A3.6 sind anhand der CO₂-Konzentration verschiedene Maßnahmen angegeben. Liegt die CO₂-Konzentration unterhalb von 1.000 ppm Teile pro Million (en: Parts Per Million), so sind keine Maßnahmen erforderlich. Bei einer Konzentration von 1.000 - 2.000 ppm ist das Lüftungsverhalten zu überprüfen und eine Lüftungsmaßnahme durchzuführen. In den Simulationen wird der Setpoint für das Öffnen des Fensters auf 1.500 ppm festgelegt. Die Setpoints für die Fensterlüftung sind in folgender Tabelle 7.2 zusammengefasst.

Tabelle 7.2 Randbedingungen der Gebäudenutzung für Fensterlüftung

Bezeichnung	Setpoint
Mindest-Raumtemperatur	22 °C
Maximal-Raumtemperatur	25 °C
CO ₂ -Konzentration	1.500 ppm

Sonnenschutz

Für das Aktivieren des Sonnenschutzes an den Fenstern wird ein Setpoint von 200 W/m² verwendet. Übersteigt die Sonneneinstrahlung auf der Fassade diesen Wert, wird der Sonnenschutz am Fenster heruntergefahren.

7.2.4 Klimadaten

Die verwendeten Klimadaten basieren auf aktuellen Testreferenzjahren (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Angeboten werden die Datensätze für jeden Ort in Deutschland mit einer räumlichen Auflösung von 1 km². Verwendet wird das Szenario TRY-2015, wobei für dieses Szenario insgesamt drei verschiedene Datensätze zur Verfügung stehen (ein mittleres Jahr, ein extremer Sommer und ein extremer Winter). Im Rahmen dieser Arbeit wird das mittlere Jahr verwendet. Die charakteristischen Eigenschaften des verwendeten TRY-2015 sind in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3 Eigenschaften des verwendeten Datensatzes zum Testreferenzjahre TRY-2015

Bezeichnung	TRY-2015
Minimale Temperatur	-13,3 °C
Maximale Temperatur	32,7 °C
Mittelwert	9,4 °C

Für den aktuellen Zeitraum (TRY-2015) beträgt die minimale Temperatur -13,3 °C und die maximale Temperatur von 32,7 °C. Anhand des gesamten Datensatzes ergibt sich eine jährliche mittlere Temperatur von 9,4 °C.

7.3 Grundlagen der Vergleichsvarianten

Die Vergleichsvarianten dienen als Grundlage, um die Ergebnisse aus den parametrischen Optimierungen einzuordnen und vergleichbar zu machen. Die Vergleichsvarianten basieren auf dem Referenzgebäude des baurechtlich geltenden Gebäudeenergiegesetzes (GEG) (v01) und der umgesetzten Ausführungsvariante des Gebäudes (v02). Im Folgenden sind die definierten Eigenschaften und Kennwerte der Baukonstruktion (BK) und der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) beschrieben und erläutert. Darauf aufbauend wird die LCA für die Wirkungsindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) beschrieben. Abschließend sind die ökologischen Flächenbedarfe (ELD) auf Basis der LCA dargestellt.

7.3.1 Beschreibung der Baukonstruktion und Technische Gebäudeausrüstung

Die erste Variante (v01) basiert auf dem Referenzgebäude gemäß GEG [54]. In Ergänzung dazu stellt die zweite Variante (v02) die Ausführungsvariante des Gebäudes dar [215]. Die charakteristischen Eigenschaften der TGA sind in Tabelle 7.4 aufgelistet.

Tabelle 7.4 Angaben zur Baukonstruktion und der Technischen Gebäudeausrüstung der beiden Grundvarianten v01 und v02

	v01 - GEG	v02 - Ausführung
Baukonstruktion (BK)	Stahlbeton	Stahlbeton/Ziegel/Kalksandstein
Heizung	Gas-Brennwertkessel	Luft-Wasser-Wärmepumpe
Wärmeübergabe	Radiatoren	Fußbodenheizung
Kühlung	Kompressionskältemaschine	reversible Luft-Wasser-Wärmepumpe
Mechanische Lüftung	n.v.	n.v.
Photovoltaik	n.v.	23,5 kWp
Solarthermie	n.v.	n.v.

Die Tragkonstruktion der Variante v01 besteht aus einem konventionellen Massivbau in Stahlbetonbauweise. Für die Wärmedämmung wird angenommen, dass Außenwand, Dach und Trittschalldämmung der Geschossdecke aus einer EPS-Dämmung (Expandiertes Polystyrol) besteht. Für die Wärmedämmung unterhalb der Bodenplatte wird eine XPS-Wärmedämmung (Extrudiertes Polystyrol) angesetzt. Hinsichtlich der BK weist das umgesetzte Gebäude ebenfalls eine Massivbauweise auf. Das Besondere an dem Fallbeispiel (v02) ist, dass die drei Außenwände der Geschosse in verschiedenen Bauweisen realisiert wurden. Das Erdgeschoss besteht aus Stahlbeton, das erste Obergeschoss aus Ziegel und das zweite Oberge-

schoß aus Kalksandstein. Dargestellt sind die einzelnen Bauteile mit den Schichtdicken, verwendeten Ökobilanz-Datensätzen und den Lebensdauern im Anhang B.

Hinsichtlich der TGA verfügt Variante v01 über einen Gas-Brennwertkessel mit Radiatoren für die Wärmeübergabe. Die Ausführungsvariante v02 weist eine Luft-Wasserwärmepumpe mit Fußbodenheizung auf. Die Wärmepumpe wird zudem reversibel für die Kühlung verwendet. Die Lüftung beider Varianten erfolgt über natürliche Fensterlüftung. Die Erzeugung von erneuerbarer Energie erfolgt bei der Ausführungsvariante durch den Einsatz einer Photovoltaikanlage. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der thermischen Gebäudehülle ergeben sich gemäß GEG und den projektspezifischen Angaben [54, 215]. Aufgelistet sind die U-Werte in Tabelle 7.5.

Tabelle 7.5 Wärmedurchgangskoeffizienten der beiden Grundvarianten

	Wärmedurchgangskoeffizient U in W/m ² K	
	v01	v02
Außenwand	0,28	0,18
Bodenplatte	0,35	0,19
Dach	0,20	0,15
Fenster	1,30	0,87

7.3.2 Lebenszyklusanalysen

Auf Basis der beschriebenen BK und TGA sind die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA) für GWP in Tabelle 7.6 auf Seite 100, für AP in Tabelle 7.7 auf Seite 101 und EP in Tabelle 7.8 auf Seite 103 dargestellt. Beschrieben sind jeweils die absoluten Werte für die einzelnen Lebenszyklusphasen (Herstellung, Nutzung, Austausch und Entsorgung) getrennt nach den Komponenten der BK und TGA, die Nutzungsphase und das Recyclingpotenzial sowie die relativen Anteile bezogen auf die Gesamtsumme.

Tabelle 7.6 Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO₂-Äq. für die Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung), dargestellt getrennt nach den verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten des Gebäudes

	Treibhauspotenzial in kg CO ₂ -Äq.			
	v01 - GEG	Anteil	v02 - Ausführung	Anteil
Herstellung BK	257.259	16,9 %	265.362	22,8 %
Herstellung TGA	8.927	0,6 %	45.452	3,9 %
Nutzungsphase	1.114.721	73,2 %	648.897	55,8 %
Austausch BK	57.624	3,8 %	68.929	5,9 %
Austausch TGA	32.901	2,2 %	71.421	6,1 %
Entsorgung BK	44.115	2,9 %	54.024	4,6 %
Entsorgung TGA	7.523	0,5 %	9.097	0,8 %
Recyclingpotenzial	-34.129		-38.947	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	1.523.071	100 %	1.163.181	100 %

Über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich für v01 in Summe (ohne Recyclingpotenzial) ein GWP von 1.523.071 kg CO₂-Äq. und für v02 von 1.163.181 kg CO₂-Äq. Die Ausführungsvariante weist somit ein um 359.890 kg CO₂-Äq. geringeres GWP auf. Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass über den gesamten Lebenszyklus die Nutzungsphase den größten Anteil ausmacht. Für v01 umfasst die Nutzungsphase 73,2 % mit insgesamt 1.114.721 kg CO₂-Äq. und für v02 55,8 % mit insgesamt 648.897 kg CO₂-Äq. Dies entspricht einer Differenz von 465.824 kg CO₂-Äq. (-58 %), welche durch den erhöhten Wärmedämmstandard, der optimierten Wärmeversorgung und den damit einhergehenden geringeren Energiebedarf erklärt werden kann. Der zweitgrößte Anteil entfällt auf die BK. Für die Lebenszyklusphasen Herstellung, Austausch und Entsorgung umfasst die BK 23,6 % für v01 und 33,3 % für v02. Absolut wird bei v01 für die BK insgesamt 358.998 kg CO₂-Äq. und bei v02 in Summe 388.315 kg CO₂-Äq. emittiert. Die höheren Werte für v02 lassen sich durch den erhöhten Wärmedämmstandard und dem damit erhöhten Materialaufwand für die Wärmedämmung erklären. Des Weiteren zeigt sich, dass der relative Anteil der grauen Emissionen für BK bei einem energieeffizienten Gebäude steigt und somit an Bedeutung gewinnt. Die Komponenten der TGA umfassen für v01 insgesamt 49.351 kg CO₂-Äq., was einem relativen Anteil von 3,3 % entspricht. Bei v02 entfallen auf die TGA in Summe 125.970 kg CO₂-Äq. Dies entspricht einem Anteil von 10,8 %. Grafisch dargestellt sind die Ergebnisse in Abbildung 7.3.

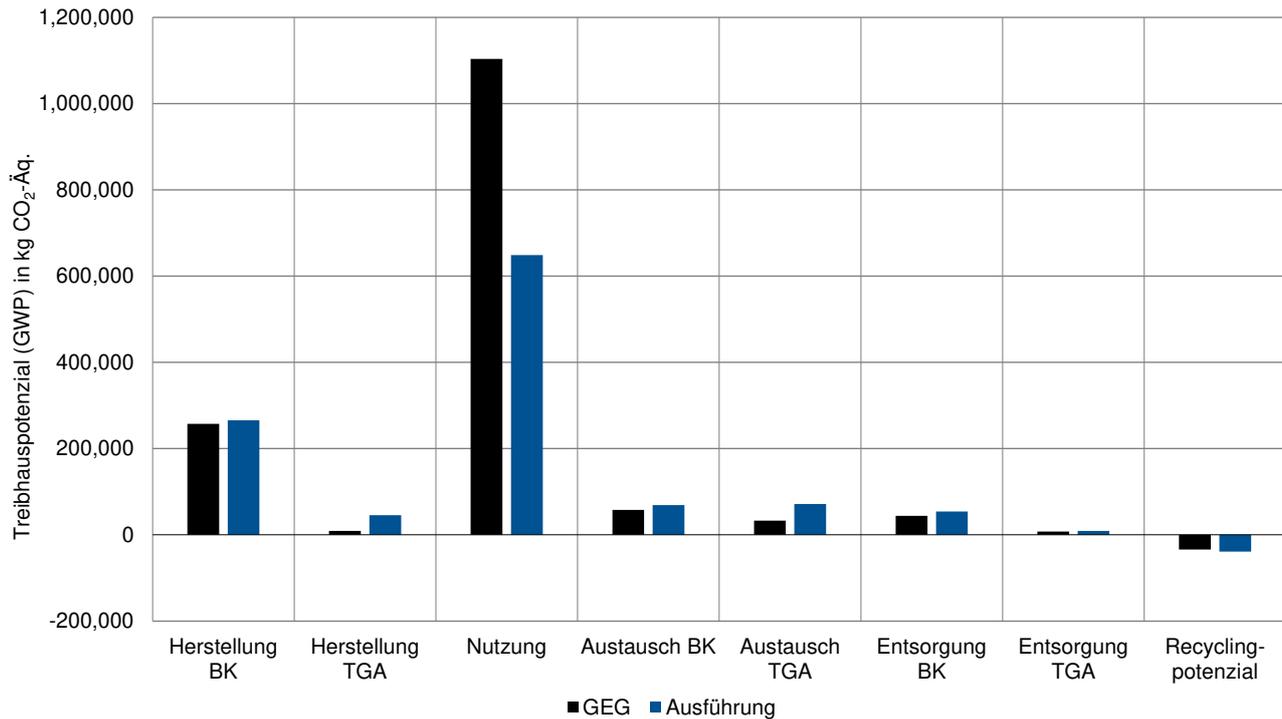


Abbildung 7.3 Verteilung des Treibhauspotenzials (GWP) in kg CO₂-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der Vergleichsvarianten v01 und v02 für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Hinsichtlich des AP (siehe Tabelle 7.7) ergibt sich für die Variante v01 (GEG) eine Gesamtsumme (ohne das Recyclingpotenzial) von 1.505 kg SO₂-Äq. und für v02 (Ausführung) von 1.870 kg SO₂-Äq. Im Vergleich zum GWP zeigt sich hierbei, dass die Ausführungsvariante höhere AP-Emissionen aufweist.

Tabelle 7.7 Versauerungspotenzial (AP) in kg SO₂-Äq. für die Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung), dargestellt getrennt nach den verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten des Gesamtgebäudes

	AP in kg SO ₂ -Äq.			
	v01 - GEG	Anteil	v02 - Ausführung	Anteil
Herstellung BK	378	25,1 %	394	21,0 %
Herstellung TGA	20	1,3 %	158	8,4 %
Nutzungsphase	858	57,0 %	908	48,6 %
Austausch BK	105	7,0 %	117	6,3 %
Austausch TGA	41	2,7 %	185	9,9 %
Entsorgung BK	103	6,8 %	104	5,5 %
Entsorgung TGA	1	0,1 %	4	0,2 %
Recyclingpotenzial	-65		-71	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	1.505	100 %	1.870	100 %

Über den gesamten Lebenszyklus ergibt sich ein um 365 kg SO₂-Äq. höheres AP. Der höchste Anteil trägt dabei die Nutzungsphase. Bei v01 beträgt der Anteil der Nutzungsphase 57,0 %, wobei diese insgesamt

858 kg SO₂-Äq. umfasst. In v02 entfallen rund 48,6 % auf die Nutzungsphase, wobei diese insgesamt 908 kg SO₂-Äq. aufweist. In beiden Varianten umfasst die Herstellung der BK den zweitgrößten Anteil. In v01 umfasst dieser 25,1 % mit 378 kg SO₂-Äq. und bei v02 21,0 % mit 394 kg SO₂-Äq. In Bezug auf die Komponenten der TGA zeigen sich deutliche Unterschiede. In Variante v01 umfasst die Herstellung der TGA 1,3 % (20 kg SO₂-Äq.), der Austausch 2,7 % (41 kg SO₂-Äq.) und die Entsorgung 0,1 % (1 kg SO₂-Äq.). Für die gesamte TGA ergibt sich somit über den Lebenszyklus ein gesamtes AP von 62 kg SO₂-Äq. In Variante v02 beträgt das AP für die TGA über den gesamten Lebenszyklus 347 kg SO₂-Äq. und somit 285 kg SO₂-Äq. mehr als bei v01. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in v02 eine Photovoltaikanlage mit 23,5 kWp (siehe Tabelle 7.4) berücksichtigt ist. In Bezug auf den Lebenszyklus ergeben sich folgende Anteile: Herstellung 8,4 %, Austausch 9,9 % und Entsorgung 0,2 %. Zusammenfassend sind die einzelnen Ergebnisse in Abbildung 7.4 dargestellt.

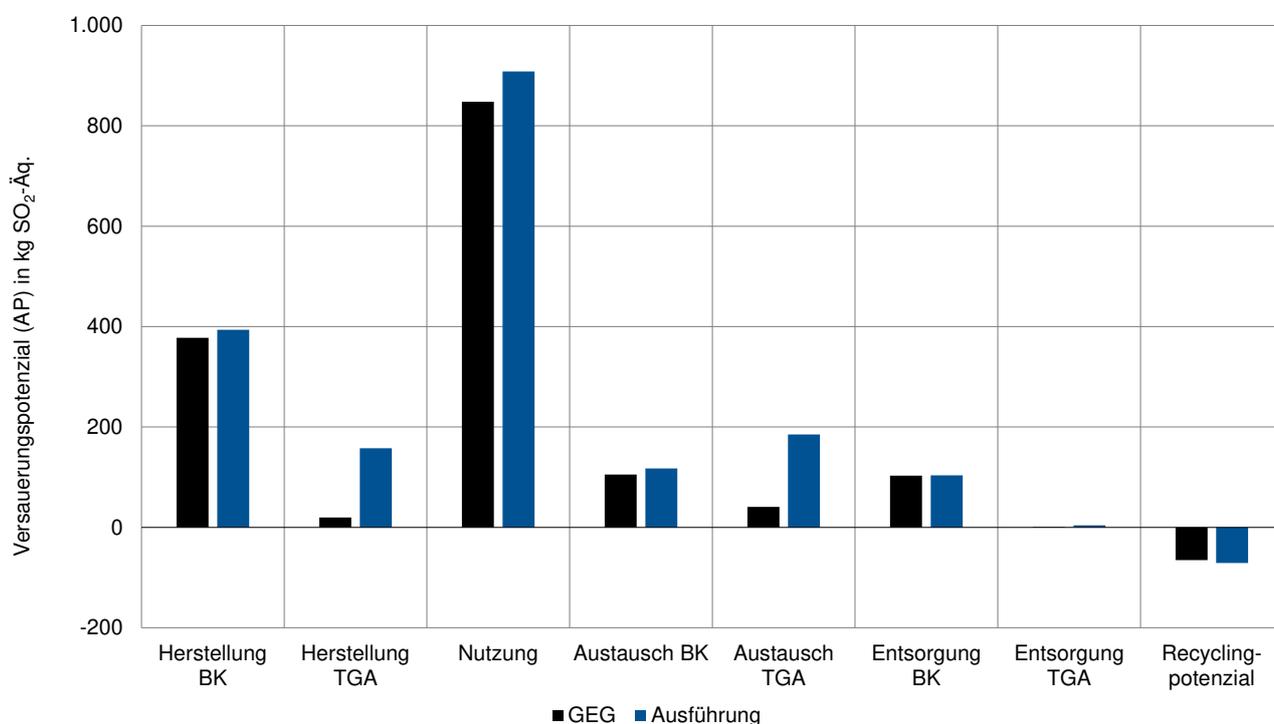


Abbildung 7.4 Verteilung des Versauerungspotenzials (AP) in kg SO₂-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der Vergleichsvarianten v01 und v02 für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen für EP sind in folgender Tabelle 7.8 auf Seite 103 aufgelistet. Es zeigt sich, dass in Bezug auf das EP die Nutzungsphase ebenfalls den höchsten Anteil aufweist. Für v01 ergibt sich ein Anteil von 58,3 % mit 158 kg Phosphat-Äq. und für v02 mit 56,0 % und 180 kg Phosphat-Äq. Ergänzend zur Nutzungsphase umfasst der gesamte Lebenszyklus der BK in Variante v01 insgesamt 108 kg Phosphat-Äq. und damit einen Anteil von 39,9 %. Dabei entfallen 23,9 % auf die Herstellung, 6,6 % auf den Austausch und 9,1 % auf die Entsorgung. In Variante v02 umfasst die BK über den Lebenszyklus 110 kg Phosphat-Äq. Hierbei entfallen 20,9 % auf die Herstellung, 5,9 % auf den Austausch und 7,7 % auf die Entsorgung. Für die Komponenten der TGA ergibt sich für einen Gesamtanteil für v01 von 2,3 % und für v02 von 10,4 %. Der deutlich höhere Anteil in v02 lässt sich äquivalent zu AP aufgrund der realisierten Photovoltaikanlage begründen.

Tabelle 7.8 Eutrophierungspotenzial EP in kg Phosphat-Äq. für die Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung), dargestellt getrennt nach den verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten des Gesamtgebäudes

	Eutrophierungspotenzial in kg Phosphat-Äq.			
	v01 - GEG	Anteil	v02 - Ausführung	Anteil
Herstellung BK	65	23,9 %	66	20,6 %
Herstellung TGA	2	0,7 %	13	4,2 %
Nutzungsphase	158	58,3 %	180	56,0 %
Austausch BK	18	6,6 %	19	5,9 %
Austausch TGA	4	1,5 %	17	5,4 %
Entsorgung BK	25	9,1 %	25	7,7 %
Entsorgung TGA	0	0,1 %	1	0,3 %
Recyclingpotenzial	-7		-8	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	271	100 %	321	100 %

Die Gesamtergebnisse zum EP sind in Abbildung 7.5 dargestellt.

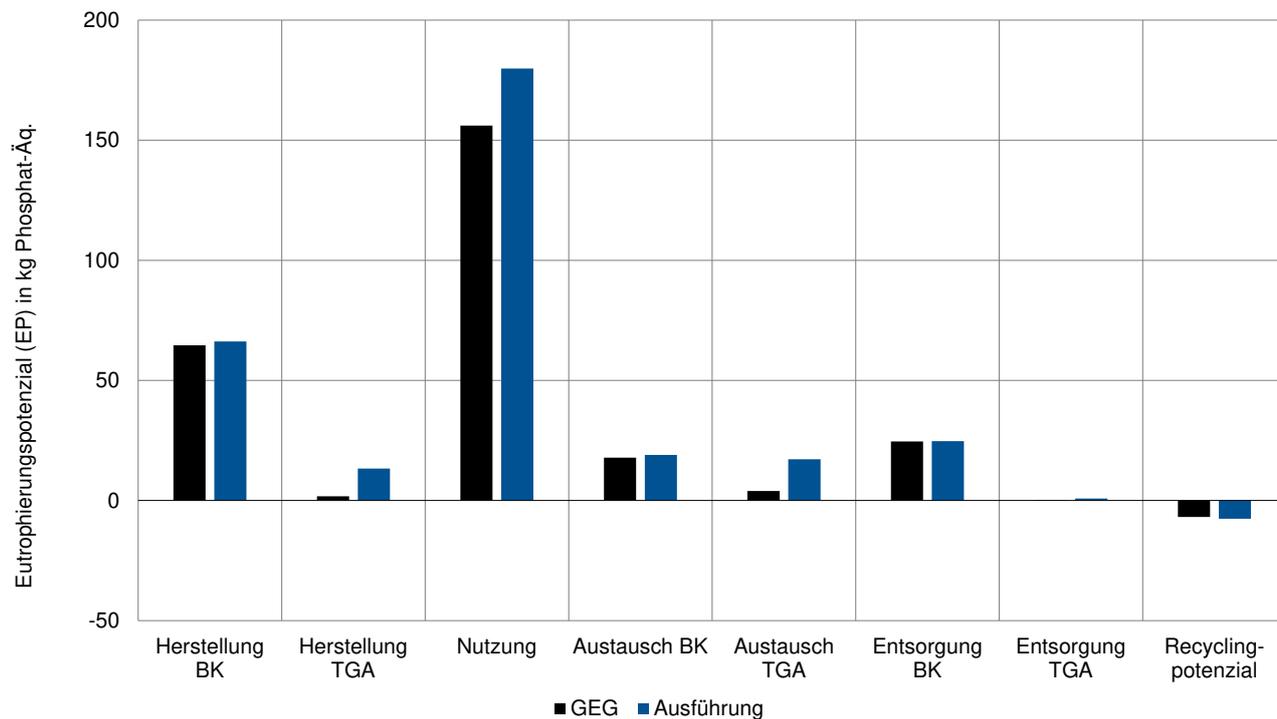


Abbildung 7.5 Verteilung des Eutrophierungspotenzials (EP) in kg Phosphat-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der Vergleichsvarianten v01 und v02 für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Aufbauend auf den dargestellten Ergebnissen zur LCA der Wirkungsindikatoren GWP, AP und EP werden im folgenden Kapitel die ökologischen Flächenbedarfe für die beiden Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung) dargestellt.

7.3.3 Ermittlung der ökologischen Flächenbedarfe

Die Ermittlung des Ökologischer Flächenbedarf (ELD) basiert auf den zuvor dargestellten Ergebnissen der LCA. Die Ergebnisse aus den Berechnungen sind im Folgenden getrennt für Variante v01 und Variante v02 dargestellt. Zur besseren Einordnung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind die einzelnen ELD getrennt nach den Wirkungsindikatoren GWP, AP und EP dargestellt. Darüber hinaus sind die ELD getrennt nach den Ökosystemen ermittelt und aufgeführt. Dies ermöglicht eine aufbauende und ökosystem-spezifische Analyse und Bewertung der Ergebnisse. Aus den einzelnen Berechnungen und den einzelnen Werten der Ökosysteme werden, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, die jeweiligen Maxima gebildet. Die Gesamtsumme aus den jeweiligen Maxima stellt abschließend den gesamten ökologischen Flächenbedarf dar.

Variante v01 (GEG)

Die Ergebnisse aus den Berechnungen zum ELD sind für Variante v01 in der folgenden Tabelle 7.9 aufgelistet. In Bezug auf den Wirkungsindikator GWP ergeben sich unter Berücksichtigung der verschiedenen Ökosysteme folgende Flächenbedarfe. Für das Ökosystem Wald ergibt sich der größte Flächenbedarf von insgesamt rund 2,01 ha/a. Dies lässt sich mit der im Vergleich zu den anderen Ökosystemen deutlich größeren Gesamtfläche in Deutschland erklären. Da die Emissionen im Rahmen der Berechnung zum ELD gleichmäßig (unter Berücksichtigung der relativen Flächenanteile) verteilt werden, entfällt somit auch der größte Anteil der Emissionen auf das Ökosystem Wald. Selbiges zeigt sich bei den Wirkungsindikatoren AP und EP. Hierbei ergibt sich ein ELD für AP von 0,464 ha/a und für EP von 0,112 ha/a. Für die anderen betrachteten Ökosysteme ergeben sich grundlegend vergleichbare Verhältnisse. Für Grünland ergibt sich ein ELD für GWP von 0,957 ha/a, für AP von 0,275 ha/a und EP von 0,018 ha/a. Für Heiden ergibt sich das Maximum des ELD für GWP mit 0,039 ha/a, für Sümpfe mit 0,033 ha/a, Moore mit 0,041 ha/a. Gewässer weisen nur Bindungskapazitäten für AP und EP wobei sich ein Flächenbedarf von 0,043 ha/a für AP ergibt. Unter Berücksichtigung der individuellen Maxima ergibt sich in Summe ein ELD von 3,125 ha/a. Es zeigt sich dabei, dass sich die individuellen Maxima (bis auf Gewässer) immer aus dem ELD des GWP ergeben. In Bezug auf das Schutzgut Ökosystem gilt daher für Variante v01 das GWP als die entscheidende Umweltwirkung, die es zu reduzieren gilt.

Tabelle 7.9 Ökologischer Flächenbedarf der Variante v01 (GEG) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme

	Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha/a			
	GWP	AP	EP	Max
Wald	2,012	0,464	0,112	2,012
Grünland	0,957	0,275	0,018	0,957
Heide	0,039	0,007	0,001	0,039
Sumpf	0,033	0,004	0,000	0,033
Moor	0,041	0,000	0,001	0,041
Gewässer	-	0,043	0,007	0,043
Summe				3,125

Grafisch sind die Ergebnisse der einzelnen ELD in Abbildung 7.6 dargestellt. Dargestellt ist dabei der ELD für GWP (in schwarz), für AP (in blau) und EP (in orange). Ersichtlich sind dabei die relativen Verhältnisse zwischen den einzelnen ELD innerhalb jedes Ökosystems.

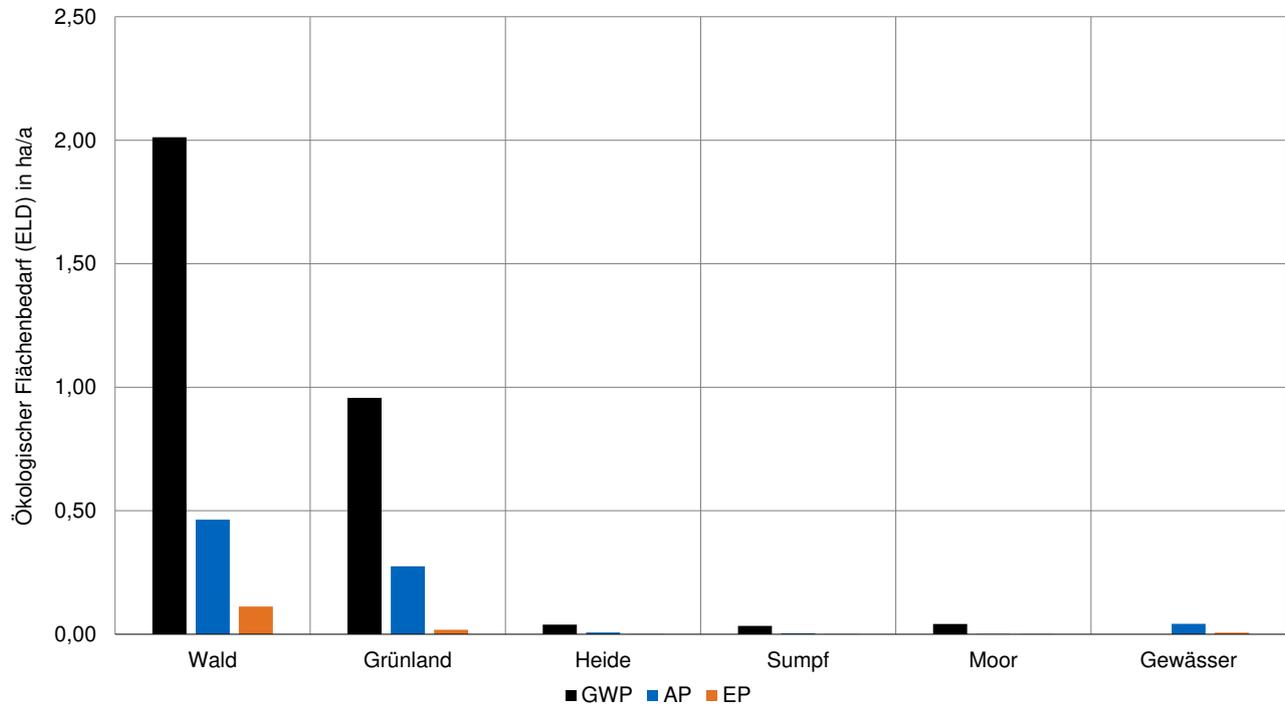


Abbildung 7.6 Verteilung der ELD auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v01 (GEG) (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Variante v02 (Ausführung)

Für die Ausführungsvariante sind die einzelnen ELDs in Tabelle 7.10 aufgelistet. Für den Wirkungsindikator GWP und das Ökosystem Wald ergibt sich ein ELD von 1,548 ha/a. Gegenüber der Variante v01 stellt dies eine Differenz von 0,464 ha/a dar. Ebenso ergeben sich, im Vergleich zu v01, für die anderen Ökosysteme geringe ELDs. Für das Grünland ergibt sich ein ELD von 0,736 ha/a und somit einer Differenz von 0,221 ha/a. Für die weiteren Ökosysteme ergeben sich ELDs von: Heide 0,030 ha/a, Sumpf 0,036 ha/a und Moor 0,032 ha/a. Des Weiteren zeigt sich, dass die jeweiligen ELDs für AP im Vergleich zu v01 höher sind. Wie bereits bei den Ergebnissen der LCA (siehe Kapitel 7.3.2) sind die Werte für AP und EP von v02 höher als von v01. Dies resultiert in beiden Wirkungsindikatoren für höheren ELDs. Bezogen auf den Wald ergeben sich ELDs von 0,580 ha/a (AP) und 0,134 ha/a (EP). Durch den geringeren ELDs für GWP und die erhöhten ELDs für AP und EP steigt somit auch das relative Verhältnis zwischen den ELDs. Zusammenfassend ergibt sich ein gesamter ELD aus den jeweiligen Maxima von 2,425 ha/a und damit eine Differenz der ELDs von v01 zu v02 von 0,700 ha/a (-22 %).

Tabelle 7.10 Ökologischer Flächenbedarf der Variante v02 (Ausführung) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme

	Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha/a			
	GWP	AP	EP	Max
Wald	1,548	0,580	0,134	1,548
Grünland	0,736	0,344	0,022	0,736
Heide	0,030	0,017	0,001	0,030
Sumpf	0,026	0,009	0,001	0,026
Moor	0,032	0,000	0,001	0,032
Gewässer	-	0,053	0,008	0,053
Summe				2,425

Grafisch sind die Ergebnisse der einzelnen ELDs für Variante v02 in folgender Abbildung 7.7 auf Seite 107 dargestellt. Dargestellt ist dabei der ELD für GWP (in schwarz), für AP (in blau) und EP (in orange).

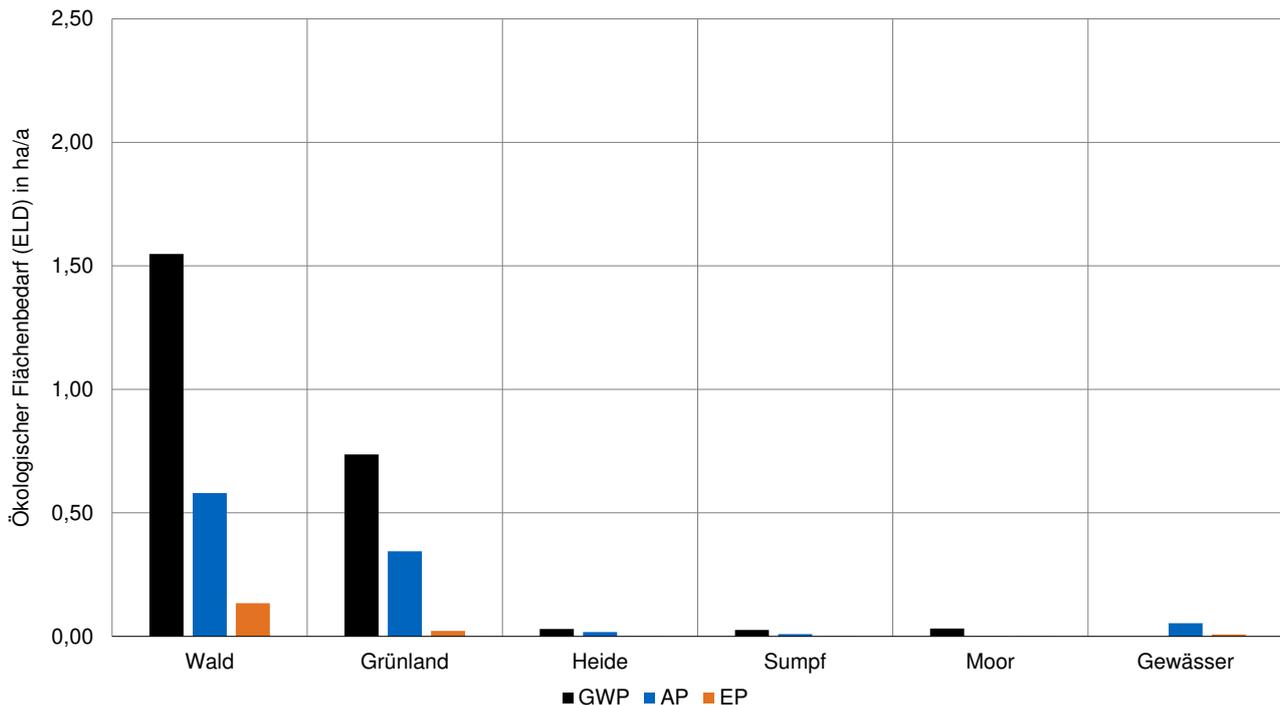


Abbildung 7.7 Verteilung der ELD auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v02 (Ausführung) (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren)(eigene Darstellung)

7.4 Parametrische Analyse

Im Folgenden werden die Variablen der parametrischen Analyse beschrieben, wobei sich diese in die unabhängigen Variablen (Eingangsvariablen) und die abhängigen Variablen unterteilen. Unabhängige Variablen sind Parameter, die bewusst ausgewählt und variiert werden. In der Gebäudeplanung spielen unabhängige Variablen eine wesentliche Rolle, da sie als Parameter dienen, die bei der Gestaltung und Planung eines Gebäudes diskutiert werden. Diese Variablen umfassen Parameter wie beispielsweise die Wahl des Energiesystems, Baukonstruktion, Fläche der PV-Anlage. Die Entscheidungen, die in Bezug auf diese unabhängigen Variablen getroffen werden, können direkte Auswirkungen auf die definierte abhängige Variable (bspw. Energiebedarf) des Gebäudes haben. Die abhängigen Variablen repräsentieren die beobachteten oder gemessenen Ergebnisse, welche durch die gezielte Variation der unabhängigen Variablen beeinflusst werden. Sie fungieren als das zu untersuchende Ergebnis, das einer detaillierten Analyse unterzogen wird, um den Effekt der unabhängigen Variable zu analysieren und zu bewerten. Im Rahmen dieser Arbeit dient der ökologische Flächenbedarf (ELD) als die abhängige Variable.

7.4.1 Unabhängige Variablen

Die unabhängigen Variablen (siehe Tabelle 7.11) umfassen Parameter, die im Rahmen der Gebäudeplanung von Planenden beeinflusst werden können.

Tabelle 7.11 Auflistung der Parameter und deren Variationsbereiche

Nr.	Parameter	Bezeichnung	Einheit	Variationsbereich
1	dWD_{AW}	Dicke Wärmedämmung Außenwand	m	0,02 - 0,50
2	dWD_{DA}	Dicke Wärmedämmung Dach	m	0,02 - 0,50
3	dWD_G	Dicke Wärmedämmung Bodenplatte	m	0,02 - 0,50
4	U_f	U-Wert Fensterrahmen	W/m^2K	0,60 - 2,80
5	U_g	U-Wert Fensterglas	W/m^2K	0,60 - 2,90
6	F_c	Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes	-	0,15 - 0,65
7	g	Gesamtenergiedurchlassgrad	-	0,30 - 0,75
8	$L_{um,eff}$	Lichtausbeute der Beleuchtung	lm/W	10 - 160
9	n_{50}	Luftdichtigkeit des Gebäudes	h^{-1}	0,3 - 3,0
10	A_{PV}	Fläche Photovoltaikanlage	m^2	0 - 200
11	W_{PV}	Aufstellwinkel Photovoltaikanlage	°	0 - 90
12	O_{PV}	Orientierung Photovoltaikanlage	°	-180 - +180
13	A_{ST}	Fläche Solarthermieanlage	m^2	0 - 200
14	W_{ST}	Aufstellwinkel Solarthermieanlage	°	0 - 90
15	O_{ST}	Orientierung Solarthermieanlage	°	-180 - +180
16	$U_{tank,hot}$	U-Wert des Warmwasserspeichers	W/m^2K	0,1 - 1,0
17	$U_{tank,cold}$	U-Wert des Kaltwasserspeichers	W/m^2K	0,1 - 1,0
18	$V_{tank,hot}$	Volumen des Warmwasserspeichers	m^3	0,1 - 2,0
19	$V_{tank,cold}$	Volumen des Kaltwasserspeichers	m^3	0,1 - 2,0
20	BK	Art der Baukonstruktion	-	4 Arten
21	ES	Typ des Energiesystems	-	11 Typen
22	Mix_{el}	Strommix	-	4 Typen

Hinsichtlich der Baukonstruktion (BK) werden im Parameter 20 vier grundlegende Arten analysiert. Aufgelistet sind diese unter Berücksichtigung der einzelnen Bauteile in Tabelle 7.12 auf Seite 109. Die Bauteilaufbauten der Holzvarianten basieren auf Angaben der Onlinedatenbank *dataholz*. *Dataholz* stellt ein Katalog mit bauphysikalisch und ökologisch geprüften Bauteilaufbauten dar, die von akkreditierten Prüfanstalten geprüft und freigegeben sind [219]. Dargestellt sind die Bauteilaufbauten in Anhang B.

Tabelle 7.12 Untersuchte Baukonstruktionsarten des Parameters 20: Art der Baukonstruktion

Bauteil	Massivbau	Monolithisch	Holz-Massiv	Holz-Leichtbau
Außenwand	Stahlbeton	Ziegel	Massivholz	Holzrahmen
Bodenplatte	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton
Dach	Stahlbeton	Stahlbeton	Massivholz	Massivholz
Geschossdecken	Stahlbeton	Stahlbeton	Massivholz	Holzbalken
Innenwand-Massiv	Stahlbeton	Kalksandstein	Massivholz	Massivholz
Innenwand-Leicht	GK-Ständer	GK-Ständer	GK-Ständer	GK-Ständer

In Bezug auf das Energiesystem (Parameter 21) werden folgende Energieversorgungsvarianten untersucht:

- Gas-Brennwertkessel
- Hackschnitzelkessel
- Holzpelletkessel
- Fernwärme (FW) (Deutscher-Mix, Biogas, Biomasse, Erdgas und aus Abfällen)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe (COP = 3,7)
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe (COP = 5,7)
- Sole-Wasser-Wärmepumpe (COP = 4,6)

In Bezug auf den Strom-Mix wird zwischen drei grundlegenden Szenarien unterscheiden. Ein konservatives Szenario stellt die Verwendung des Strom-Mix 2018 dar. Über den definierten Zeitraum wird daher keine potenzielle Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien im Strom-Mix berücksichtigt. Um die potenzielle Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien abzubilden, stellt die ÖKOBAUDAT einzelne Datensätze für die kommenden Jahrzehnte (2020, 2030, 2040 und 2050) zur Verfügung. Für die Prognose des Strom-Mix 2020-2070 wurde anhand dieser einzelnen Datensätze jährlich interpoliert. Darüber hinaus werden zwei Datensätze, basierend auf erneuerbaren Energien, verwendet.

- Strom-Mix 2018
- Strom-Mix 2020-2070
- Strom aus Wasserkraft
- Strom aus Windkraft

7.4.2 Abhängige Variable

Die abhängige Variable stellt im Rahmen dieser Arbeit der Ökologischer Flächenbedarf (ELD) dar. Der ELD stellt dabei die Fläche an natürlichen Ökosystemen dar, die benötigt wird, um die jährlichen Gebäudeemissionen zu binden, ohne dass dabei schädliche Auswirkungen an den Ökosystemen entstehen.

7.4.3 Sensitivität der definierten Parameter

Die Ergebnisse der Sensitivität der definierten Untersuchungsparameter werden in Bezug zum ELD des gesamten Gebäudes über den gesamten Betrachtungszeitraum des Fallbeispiels dargestellt. Als Grundmodell wird für die im Folgenden durchgeführte Sensitivitätsanalyse die Variante v01 (GEG) gewählt (siehe Kapitel 7.3). Die Sensitivität der einzelnen Parameter wird mithilfe der lokalen Sensitivitätsanalyse nach der one-step-at-a-time Methode (OAT-Methode) ermittelt. Hierbei werden einzelne Parameter im Rahmen des definierten Bereichs variiert. Anschließend wird deren Einfluss auf die Zielgröße ermittelt, während alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Zusammenfassend dient die Analyse der Sensitivität der Parameter zu folgenden Aspekten:

- Identifikation einflussreicher Parameter
- Identifikation einflussarmer Parameter
- Reduktion der zu optimierenden Parameter, um die Simulationszeiten der Optimierung zu reduzieren
- Festlegung derjenigen Parameter, denen ein Fixwert zugeteilt wird

Die Gesamtergebnisse der Analyse zur Sensitivität der Parameter ist in Abbildung 7.8 auf Seite 111 in Form von Boxplots dargestellt. Auf der x-Achse sind die definierten Parameter gemäß Tabelle 7.11 auf Seite 108 aufgeführt. Auf der y-Achse ist der ELD in ha/a dargestellt. Anhand der Boxplots werden Eigenschaften über die Streuungsmaße der untersuchten Parameter dargestellt. Die Box zeigt den Interquartilsabstand auf. Der Interquartilsabstand besteht aus dem ersten und dritten Quartil. Das erste Quartil stellt den Wert dar, unter dem die geringsten 25 % der Werte liegen und das dritte Quartil den Wert, über dem die höchsten 25 % der Werte liegen. Innerhalb der Box befinden sich 50 % des gesamten Wertebereichs der Streuung. Die Antennen (bzw. Whiskers) der Boxplots geben die 5 % und 95 % Quartile an. Des Weiteren sind der Median als Strich innerhalb der Box, der statistische Mittelwert als x und die komplette Streuung (bzw. Ausreißer) der Werte als o dargestellt. Grundsätzlich gilt, je größer die Box respektive je größer die Ausreißer, desto größer ist die Streuung und damit der Einfluss des Parameters auf die Zielgröße.

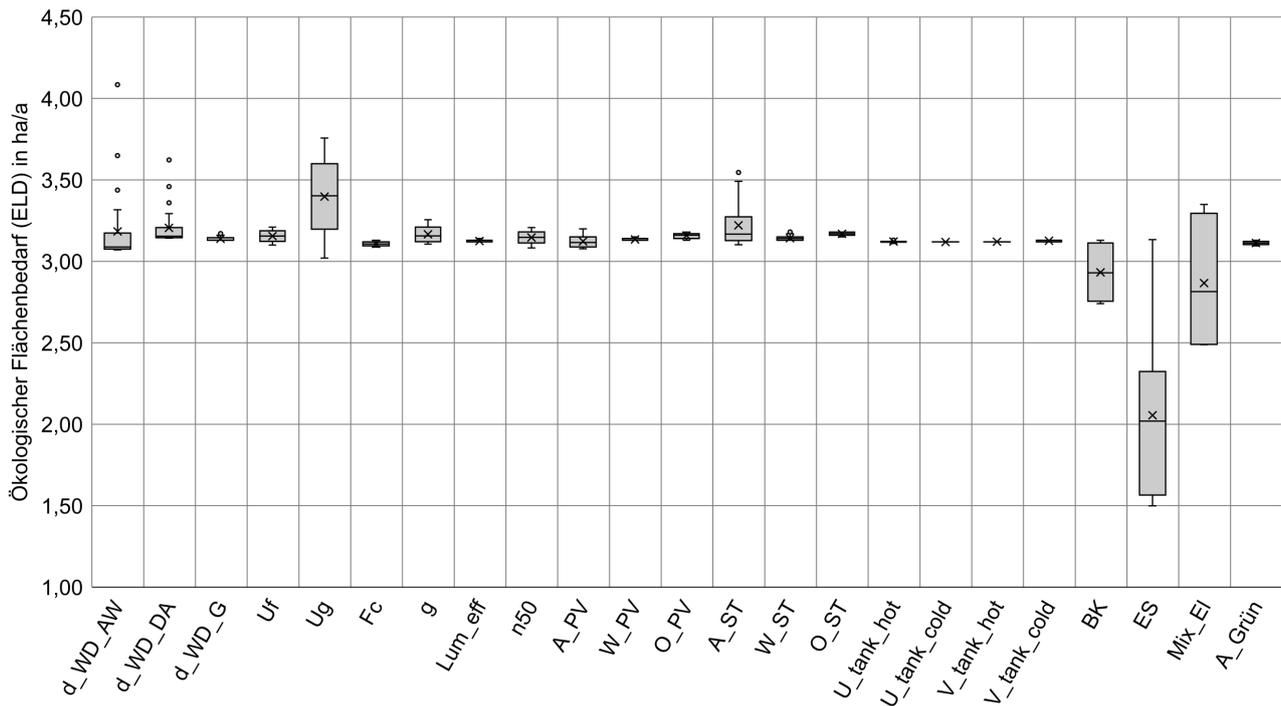


Abbildung 7.8 Ergebnis der Berechnungen zur Sensitivität der definierten Parameter in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf ELD anhand von Boxplots (eigene Darstellung)

Anhand der dargestellten Boxplots zeigen sich diejenigen Parameter, die einen signifikanten Einfluss auf den ELD aufgrund des hohen Interquartilsabstand und des hohen Streuungsmaßes der Ausreißer haben. Im Rahmen des ökologischen Bauens müssen diese Parameter im Planungsprozess berücksichtigt und optimiert werden. Des Weiteren zeigt sich anhand der Boxplots, ob die Variation der Parameter tendenziell einen positiven oder negativen Einfluss auf den ELD hat. Ein positiver Einfluss auf den ELD ist dadurch gekennzeichnet, dass durch die Manipulation der Parameter eine Reduktion des ELD hervorgerufen wird, das heißt die Boxplots nach unten ausschlagen. Ein negativer Einfluss, also eine Erhöhung des ELD, ist durch höhere Werte und somit einem Ausschlag nach oben gekennzeichnet. Anhand der Ergebnisse ergeben sich folgende einflussreiche Parameter:

- d_WD_AW: Dicke der Wärmedämmung der Außenwand
- d_WD_DA: Dicke der Wärmedämmung des Dachs
- Uf: U-Wert der Fensterrahmen
- Ug: U-Wert der Fensterverglasung
- g-Wert: Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung
- n50: Luftdichtigkeit des Gebäudes
- A_PV: Fläche der Photovoltaikanlage
- A_ST: Fläche der Solarthermieanlage
- BK: Art der Baukonstruktion
- ES: Energiesystem
- Mix_EI: Strom-Mix

Die einzelnen Berechnungen zu den einflussreichen Parametern werden im Folgenden analysiert und dargestellt. In Abbildung 7.9 auf Seite 113 sind die Ergebnisse der Sensitivität auf den ELD der Parameter, Dicke der Wärmedämmung für die Außenwand und Dach (a), U-Wert der Fensterrahmen (b), U-Wert der Verglasung (c), Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung (d), Luftdichtigkeit (e) und die Fläche der Photovoltaik- bzw. Solarthermieanlage (f) dargestellt. Zusammenfassend ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- **Dicke der Wärmedämmung der Außenwand und des Dachs:** Die Ergebnisse der Berechnungen zur Dicke der Wärmedämmung der Außenwände und des Dachs zeigen, dass in beiden Fällen eine Reduktion des ELD erkennbar ist. Der ELD nimmt zwischen den Dämmstoffdicken von 2 cm bis zur optimalen Dämmstoffdicke von etwa 30 cm ab, bei Dämmstoffdicken über 32 cm steigt der ELD leicht an. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Umweltwirkungen durch den erhöhten Materialeinsatz höher als die erzielten Energieeinsparungen sind. Der ELD streut im Rahmen der Variation der Dämmstoffdicken zwischen 3,08 und 4,08 ha/a.
- **U-Wert der Fensterrahmen und -verglasung:** Hinsichtlich des U-Werts der Fensterrahmen und der Verglasung zeigt sich eine linear positive Korrelation. Der ELD streut zwischen 3,10 und 3,22 ha/a (U-Wert Fensterrahmen) und zwischen 3,02 und 3,76 ha/a (U-Wert Fensterverglasung). Das heißt, wenn der U-Wert zunimmt, steigt ebenso der ELD. Des Weiteren zeigt sich, dass der U-Wert der Verglasung einen höheren Einfluss auf den ELD aufweist. Dies lässt sich durch den höheren Flächenanteil am Gesamtgebäude erklären.
- **Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung:** In Bezug auf den Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung zeigt sich, dass sich mit steigendem g-Wert der ELD reduziert. Dies lässt sich damit begründen, dass durch den höheren g-Wert mehr solare Strahlung in das Gebäude gelangt und somit der Energiebedarf für das Heizen reduziert wird. Insgesamt streut der ELD zwischen 3,11 und 3,26 ha/a
- **Luftdichtigkeit der Gebäudehülle:** Der Parameter der Luftdichtigkeit zeigt einen steigenden linearen Zusammenhang, mit einem Streuungsmaß von 3,08 bis 3,21 ha/a. Das heißt, je undichter das Gebäude, umso höher wird der ELD. Dies lässt sich dadurch begründen, dass mit steigender Undichtigkeit der Gebäudehülle der Lüftungswärmeverlust steigt und damit auch der Gesamtenergiebedarf des Gebäudes.
- **Fläche der Photovoltaikanlage (PV) und Solarthermieanlage (ST):** Hinsichtlich der Flächen der Photovoltaik- und Solarthermieanlage zeigt sich, dass sich bei steigender Kollektorfläche der ELD zunächst reduziert. Bei der Photovoltaikanlage nimmt der ELD zwischen der Kollektorfläche von 0 m² und 50 m² ab. Danach ist ein steigender ELD erkennbar. Bei der Solarthermieanlage reduziert sich der ELD zwischen einer Kollektorfläche von 0 m² bis ca. 90 m². Äquivalent zum Parameter der Dämmstoffdicken reduziert sich der Energiebedarf durch die Erhöhung der Kollektorflächen. Ab gewissen Zeitpunkten ist jedoch die erzielte Reduktion geringer als die grauen Energien und Umweltwirkungen in den PV und ST-Anlagen. Das Streuungsmaß bei der Betrachtung der Fläche der Photovoltaikanlage beträgt 3,08 bis 3,20 ha/a und der Solarthermieanlage 3,09 bis 3,55 ha/a.

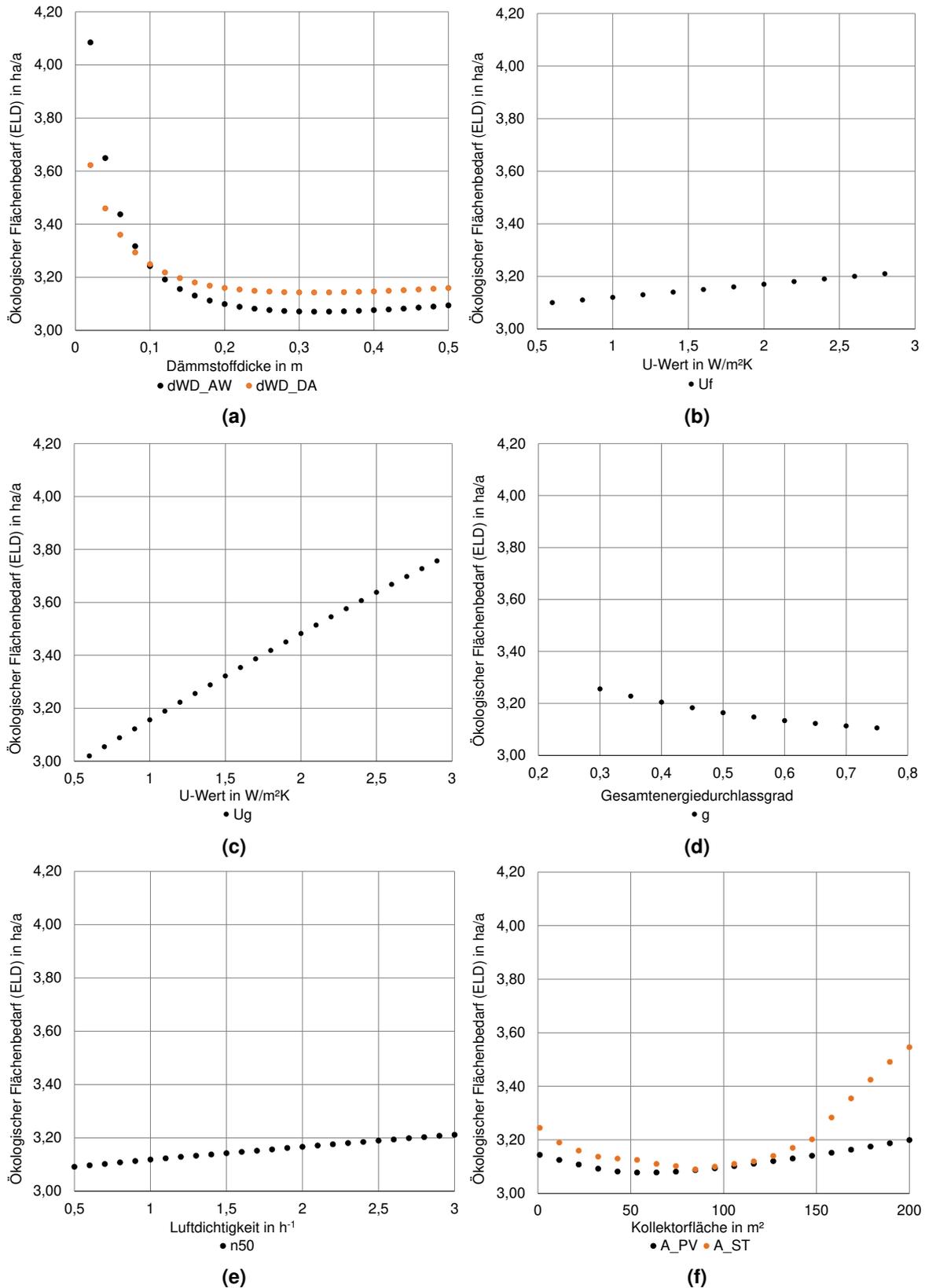


Abbildung 7.9 Darstellung der Einflüsse untersuchter Parameter auf den ökologischen Flächenbedarf ELD. Dargestellt sind Dicke der Wärmedämmung für die Außenwand und Dach (a), U-Wert der Fensterrahmen (b), U-Wert der Verglasung (c), Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung (d), Luftdichtigkeit (e) und die Fläche der Photovoltaik- bzw. Solarthermieanlage (f)

Die Ergebnisse zu den Berechnungen der verschiedenen Baukonstruktionsarten sind in der Abbildung 7.10 dargestellt. In Bezug auf den ELD zeigt sich eine Streuung zwischen der Grundvariante (siehe Kapitel 7.3) von 2,74 bis 3,13 ha/a. Durch die Änderung der BK ergibt sich bei einer monolithischen Bauweise aus Ziegel eine Reduktion des ELD um 0,07 ha/a auf 3,06 ha/a. Verglichen hierzu zeigen die beiden Holzvarianten eine deutliche Reduktion des ELD auf. Für die Holzleichtbauweise zeigen die Berechnungen einen ELD von 2,80 ha/a, was einer Reduktion um 0,33 ha/a respektive 10,5 % entspricht. Die Holzmassivbauweise weist einen ELD von 2,74 ha/a auf. Dies entspricht einer Reduktion um 0,39 ha/a und 12,5 %. Anhand der Ergebnisse zur BK zeigt sich, dass die Verwendung von nachwachsenden Materialien einen positiven Einfluss zur Reduktion des ELD aufweist.

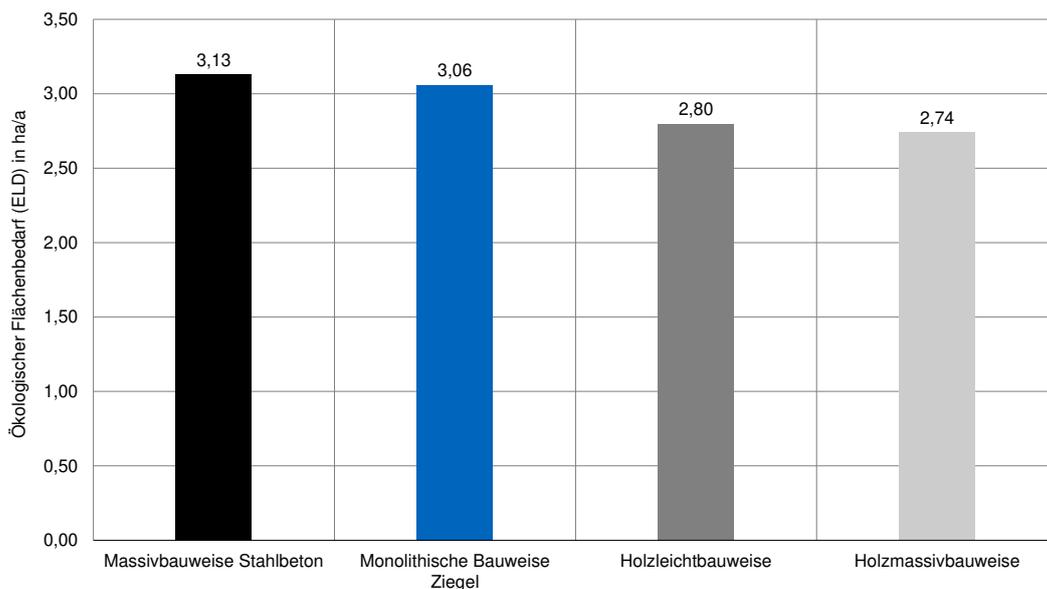


Abbildung 7.10 Vergleich verschiedener Bauweisen in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf ELD des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Hinsichtlich des Energiesystems sind die Ergebnisse in Abbildung 7.11 auf Seite 115 dargestellt. Unter Berücksichtigung der untersuchten Energiesysteme, bestehend aus dem Gas-Brennwertkessel der Vergleichsvariante mit den vier Wärmepumpen, zwei Brennwertkessel mit Pellets und Hackschnitzel sowie der Fernwärme (inkl. der fünf verschiedenen Energieerzeugungsarten), ergibt sich eine Streuung des ELD von 1,50 bis 3,13 ha/a. Verglichen mit den anderen untersuchten Parametern ergibt sich hierbei das höchste Streuungsmaß und somit der größte Einfluss auf den ELD. Für die untersuchten Wärmepumpenarten ergibt sich eine Streuung von 2,17 ha/a bis 2,20 ha/a, wobei die Wasser-Wasser Wärmepumpe (WW-WP) den geringsten ELD aufweist. Die beiden Sole-Wasser Wärmepumpen (SW-WP) mit Erdsonden und Erdkollektoren weisen einen ELD von 2,18 und 2,16 ha/a auf. Den höchsten ELD der vier Wärmepumpen weist die Luft-Wasser Wärmepumpe (LW-WP) mit 2,20 ha/a auf. Anhand der Wärmepumpen zeigt sich außerdem, dass der Strom-Mix einen erheblichen Einfluss auf den ELD haben kann. Durch die Berücksichtigung von Ökostrom (Datensatz aus der ÖKOBAUDAT: Strom aus Wasserkraft) reduziert sich der jeweilige ELD auf 1,55 ha/a (LW-WP), 1,54 ha/a (SW-WP mit Erdsonden), 1,52 ha/a (SW-WP mit Erdkollektoren) und 1,50 ha/a (WW-WP). Die Brennwertkessel mit den Energieträgern Pellets und Hackschnitzel weisen einen ELD von 1,71 ha/a und 1,62 ha/a auf. Bei der Fernwärme zeigt sich, dass der ELD maßgeblich vom Energieträger abhängt. Der für Deutschland aktuell geltende Fernwärme Mix (gemäß ÖKOBAUDAT) weist

einen ELD von 2,95 ha/a auf. Bei der Verwendung von biogenen Energieträgern wie bspw. Biogas oder Biomasse reduzieren sich die ELD auf 1,88 ha/a und 1,60 ha/a. Anhand der Ergebnisse zeigt sich der große Einfluss des Energiesystems und der Einfluss von erneuerbaren Energieträgern. Die wesentliche Erkenntnis für die Umsetzung nachhaltiger Gebäude und zur Reduktion des ELD stellt die Verwendung einer erneuerbaren Energieversorgung dar.

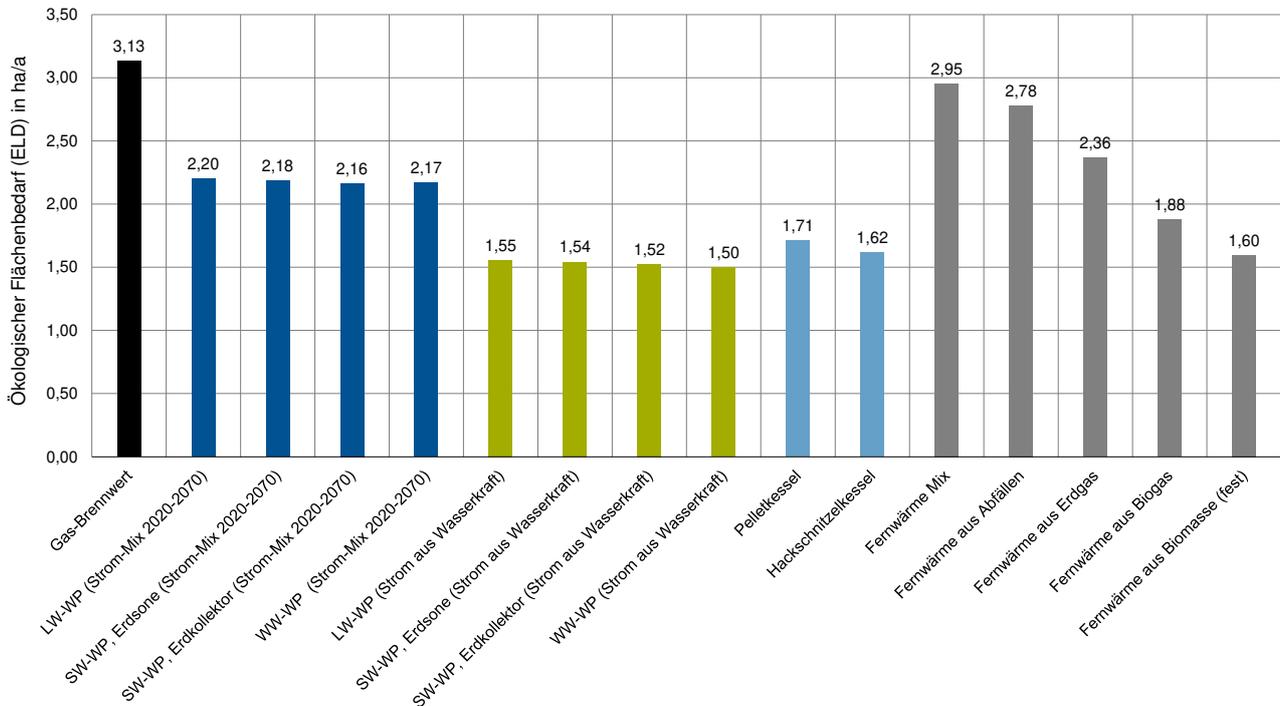


Abbildung 7.11 Vergleich verschiedener Energiesysteme in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf ELD des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Wie bereits zuvor bei den Wärmepumpen dargestellt, zeigt sich, dass der Strom-Mix einen großen Einfluss auf den ELD haben kann. In Bezug auf den gesamten Strombedarf des Gebäudes sind die Ergebnisse in Abbildung 7.12 auf Seite 116 dargestellt. Anhand der verfügbaren Daten aus der ÖKOBAUDAT lassen sich die Einflüsse anhand des Strom-Mix von 2018, potenziellen zukünftigen Szenarien von 2020 bis 2070 und zwei Ökostrom-Datensätzen, basierend auf Wasser- und Windkraft, darstellen. Für Strom aus Photovoltaikanlagen steht in der ÖKOBAUDAT kein Datensatz zur Verfügung. Sofern in der Zukunft keine Dekarbonisierung des Strommixes stattfindet, ergibt sich ein ELD von 3,35 ha/a. Für das in der ÖKOBAUDAT hinterlegte zukünftige Szenario des Strom-Mix 2020-2070 Szenario ergibt sich ein ELD von 3,13 ha/a und für die beiden Ökostrom Szenarien 2,50 ha/a (Windkraft) und 2,49 ha/a (Wasserkraft). Verglichen mit den anderen untersuchten Parametern resultiert aus der Wahl des Strommixes das zweitgrößte Streuungsmaß.

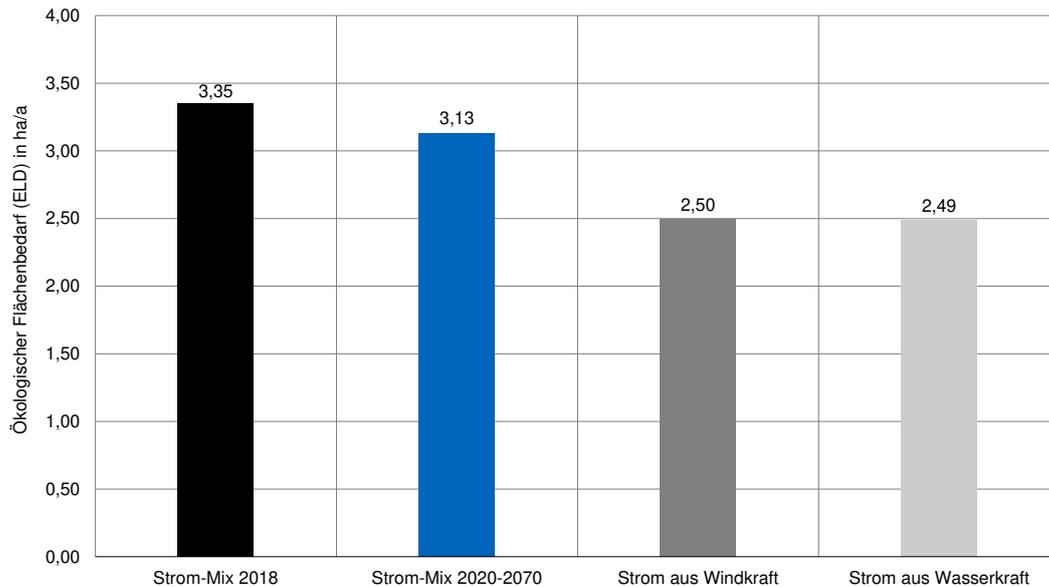


Abbildung 7.12 Vergleich verschiedener Strommix-Szenarien in Bezug auf den lebenszyklusbasierten ökologischen Flächenbedarf ELD des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

7.4.4 Festlegungen und Definitionen für die parametrischen Optimierungen

Basierend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen zur Sensitivität der definierten Parameter werden für die parametrische Optimierung folgende Festlegungen und Definitionen getroffen:

- Aufgrund des geringen Einflusses auf den ELD werden die Parameter $U_{\text{tank_hot}}$, $U_{\text{tank_cold}}$, $V_{\text{tank_hot}}$, $V_{\text{tank_cold}}$ und $L_{\text{um_eff}}$ nicht in der parametrischen Optimierung berücksichtigt. Für die genannten Parameter werden Fixwerte zugeteilt.
- Die Dicke der Wärmedämmung unterhalb der Bodenplatte $d_{\text{WD_G}}$ zeigt einen geringen Einfluss auf den ELD, ist aber in der Planungspraxis von Gebäuden ein relevanter Parameter. In der parametrischen Optimierung wird dieser Parameter daher berücksichtigt.
- Der Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes (Parameter F_c) zeigt in Bezug auf den ELD keinen großen Einfluss, allerdings ist dieser in Hinblick auf die sommerliche Überhitzung des Gebäudes entscheidend. Da die Fensterlüftung, Aktivierung des Sonnenschutzes sowie die Regelung und Steuerung der Heizung und Kühlung zur Sicherstellung eines behaglichen Innenraums ausgelegt ist, wird dieser Parameter in der parametrischen Optimierung berücksichtigt.
- Die Luftdichtigkeit des Gebäudes (Parameter n_{50}) weist einen signifikanten Einfluss auf den ELD auf, in der Planung von Gebäuden ist dieser Parameter allerdings schwer mittels thermischen Gebäudesimulationen zu planen, um konkrete Zielwerte vorzugeben. Die Luftdichtigkeit wird nach Fertigstellung des Gebäudes mittels Blower-Door-Messungen ermittelt. Darauf aufbauend werden in der Regel Anpassungen vorgenommen (z. B. Schließung von Luftundichtigkeiten an der Fassade), um die Luftdichtigkeit zu optimieren. Da im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf der Planung von Gebäuden liegt, wird für diesen Parameter ein Fixwert zugeteilt.
- In Bezug auf die untersuchte Grundvariante zeigen der Aufstellwinkel und die Orientierung der Photovoltaik- und Solarthermieanlage keinen großen Einfluss auf den ELD, stellen aber maßgebliche

Eigenschaften dieser Systeme dar und werden daher auch in den parametrischen Optimierungen berücksichtigt.

- Hinsichtlich der BK wird die parametrische Optimierung anhand der Holzmassivbauweise durchgeführt, da die Holzmassivbauweise im Vergleich mit den anderen Baukonstruktionsarten den geringsten ELD aufweist. Zum anderen stellt das Gebäude in Holzmassivbauweise eine größere Kohlenstoffsenke dar. Unter der Annahme einer nachhaltigen Forstwirtschaft wird somit, verglichen mit den anderen Bauweisen, ein größerer Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Wesentliche Aspekte zum positiven Bauen (siehe Tabelle 4.3 auf Seite 29) werden somit in der Optimierung zugrundegelegt.
- In Bezug auf das Energiesystem wird gemäß den Prinzipien zum positiven Bauen (siehe Tabelle 4.3 auf Seite 29) auf eine potenziell vollständig erneuerbare Energieerzeugung gesetzt. Es wird festgelegt, dass in der parametrischen Optimierung die Energiesysteme Luft-Wasser-Wärmepumpe (LW-WP) und Fernwärme (FW) (aus Biomasse) analysiert werden. Begründen lässt sich dies anhand der Ergebnisse zur Sensitivität, bei der grundsätzlich die Energieerzeugung durch Wärmepumpen und Fernwärme die geringsten ELDs aufweisen sowie durch die aktuelle Entwicklung der Beheizungsstruktur in Deutschland. Hierbei zeigt sich, dass die Anteile für Wärmepumpen und Fernwärme steigen [220]. Die relativen Anteile liegen aktuell für das Jahr 2021 bei 44 % für Wärmepumpen und 22,4 % für Fernwärme. Des Weiteren zeigt sich, dass 82 % der verbauten Wärmepumpen aus Luft-Wasser-Wärmepumpen bestehen [221].
- Die Optimierungen werden für die beiden Stromszenarien *Strom-Mix 2020-2070* und *Strom aus Wasserkraft* durchgeführt.

7.5 Parametrische Optimierung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zu den parametrischen Optimierungen dargestellt. Das Kapitel ist so aufgebaut, dass im ersten Schritt der Prozess der parametrischen Optimierung und die Ergebnisse der einzelnen Simulationen innerhalb der Optimierung dargestellt werden. Zur Vergleichbarkeit und zur Einordnung der Ergebnisse werden die definierten Grundvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung) ebenfalls dargestellt. Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse für die optimierten Varianten hinsichtlich Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP) und des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) dargestellt und beschrieben.

7.5.1 Grundlagen zur parametrischen Optimierung

Neben den beiden Vergleichsvarianten werden zwei grundlegende Varianten analysiert: Variante v03 mit Fernwärme (FW) und Variante v04 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe (LW-WP). Unterteilt sind die zwei Varianten zudem anhand der verschiedenen Stromszenarien (a) *Strom-Mix 2020-2070* und (b) *Strom aus Wasserkraft*. Zusammenfassend ergeben sich folgende Varianten:

- v01 - GEG
- v02 - Ausführung
- v03a - FW
- v03b - FW Ökostrom
- v04a - LW-WP
- v04b - LW-WP Ökostrom

Angaben zur Baukonstruktion (BK) und Technische Gebäudeausrüstung (TGA) sind in Tabelle 7.13 zusammengefasst.

Tabelle 7.13 Angaben zur Technischen Gebäudeausrüstung der Varianten v03a/v03b und v04a/v04b

	v03a/v03b	v04a/v04b
Baukonstruktion	Holzmassiv	Holzmassiv
Heizung	Fernwärme	Luft-Wasser-Wärmepumpe
Wärmeübergabe	Fußbodenheizung	Fußbodenheizung
Kühlung	Kompressionskältemaschine	reversible Luft-Wasser-Wärmepumpe
Mechanische Lüftung	n.v.	n.v.
Photovoltaik	vorhanden	vorhanden
Solarthermie	vorhanden	vorhanden
Ökostrom	bei Variante b	bei Variante b

In der parametrischen Optimierung werden folgende Parameter berücksichtigt (siehe Tabelle 7.14):

Tabelle 7.14 Auflistung der Parameter und deren Variationsbereiche für die parametrische Optimierung

Nr.	Parameter	Bezeichnung	Einheit	Variationsbereich
1	d_WD_AW	Dicke Wärmedämmung Außenwand	m	0,02 - 0,50
2	d_WD_DA	Dicke Wärmedämmung Dach	m	0,02 - 0,50
3	d_WD_G	Dicke Wärmedämmung Dach	m	0,02 - 0,50
5	U _g	U-Wert Fensterglas	W/m ² K	0,60 - 2,90
6	F _c	Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes	-	0,15 - 0,65
7	g	Gesamtenergiedurchlassgrad	-	0,30 - 0,75
10	A _{PV}	Fläche Photovoltaikanlage	m ²	0 - 200
11	W _{PV}	Aufstellwinkel Photovoltaikanlage	°	0 - 90
12	O _{PV}	Orientierung Photovoltaikanlage	°	-180 - +180
13	A _{ST}	Fläche Solarthermieanlage	m ²	0 - 200
14	W _{ST}	Aufstellwinkel Solarthermieanlage	°	0 - 90
15	O _{ST}	Orientierung Solarthermieanlage	°	-180 - +180

Die aufgelisteten Parameter ergeben unter Berücksichtigung der jeweiligen Variationsbereiche insgesamt rund $1,5 \times 10^{14}$ möglichen Lösungen. Für die Parameter, die im Rahmen der parametrischen Optimierung nicht berücksichtigt werden, sind folgende Fixwerte festgelegt (siehe Tabelle 7.15):

Tabelle 7.15 Auflistung der Parameter und der definierte Fixwerte

Nr.	Parameter	Bezeichnung	Einheit	Fixwert
4	U _f	U-Wert Fensterrahmen	W/m ² K	0,60
8	Lum _{eff}	Lichtausbeute der Beleuchtung	lm/W	160
9	n ₅₀	Luftdichtigkeit des Gebäudes	h ⁻¹	0,5
16	U _{tank,hot}	U-Wert des Warmwasserspeichers	W/m ² K	0,1
17	U _{tank,cold}	U-Wert des Kaltwasserspeichers	W/m ² K	0,1
18	V _{tank,hot}	Volumen des Warmwasserspeichers	m ³	1
19	V _{tank,cold}	Volumen des Kaltwasserspeichers	m ³	1

7.5.2 Parametrische Optimierung

Abbildung 7.13 zeigt die Ergebnisse der parametrischen Optimierung der vier Varianten v03a (Fernwärme), v03b (Fernwärme und Ökostrom), v04a (Luft-Wasser-Wärmepumpe) und v04b (Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Ökostrom). Verglichen dazu sind die Varianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung) dargestellt. Die Simulationsdauer für die Optimierung je Variante beträgt in etwa 170–190 Stunden auf einem Computer mit einem Intel® Xeon® 5220 CPU mit 18 Kernen (34 Threads) und 64 GB Arbeitsspeicher. Die parametrische Optimierung wurde dabei parallelisiert, das heißt pro Thread wurde jeweils eine Simulation durchgeführt. Dargestellt sind die einzelnen Simulationen (dargestellt als Punkte) und der resultierende ELD. Anhand der Ergebnisse und den Spannweiten der einzelnen Simulationen lassen sich die verwendeten Optimierungsverfahren erkennen. Der Optimierungsprozess startet mit der Anwendung des Optimierungsverfahrens Particle Swarm Optimization (PSO). Dabei werden im ersten Schritt den zu optimierenden Parametern zufällige Werte zugeteilt. Hierdurch entsteht die breite Streuung an Ergebnisse. Des Weiteren zeigt sich, dass sich im Laufe der Optimierung der ELD hin zum Optimum bewegt. Nachdem das erste Optimierungsverfahren PSO ein Optimum gefunden hat, in etwa nach 110 bis 130 Simulationen (Eine genaue Simulationsdauer kann nicht angegeben werden, da sich jeder Optimierungsprozess unterscheidet), setzt das zweite Optimierungsverfahren, das Verfahren nach Hookes-Jeeves (HJ), ein. Ab diesem Zeitpunkt sind nur noch geringfügige Schwankungen im ELD erkennbar. Dies lässt sich dadurch begründen, dass das HJ-Verfahren in jedem einzelnen Simulationsschritt nur noch einen einzelnen Parameter variiert. Basierend auf diesen Ergebnissen werden im Folgenden die einzelnen Optimierungsprozesse analysiert und ausgewertet. Für die Auswertung und Analyse werden Simulationsergebnisse mit den 5 % geringsten ELD verwendet.

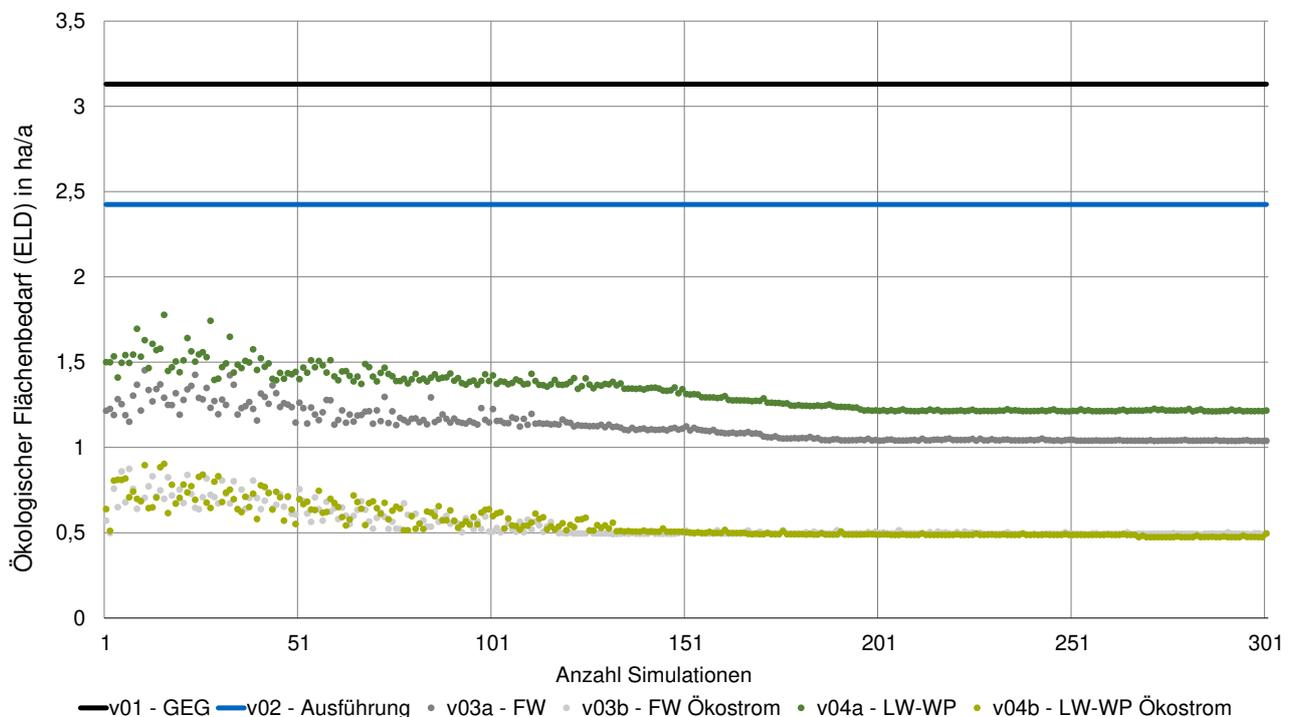


Abbildung 7.13 Darstellung der Ergebnisse aus den parametrischen Optimierungen anhand der einzelnen simulierten Varianten des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

7.5.3 Vergleich des ökologischen Flächenbedarfs

Die Ergebnisse der Berechnungen und Optimierungen zum ELD sind in Abbildung 7.14 dargestellt.

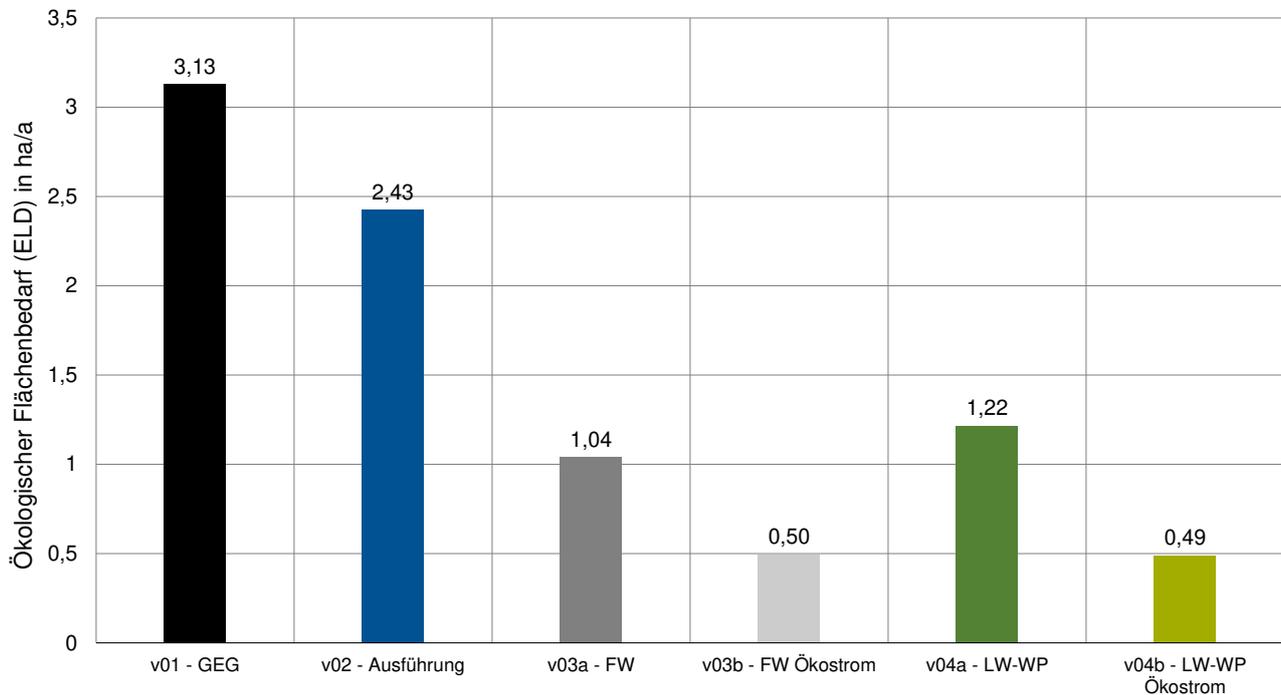


Abbildung 7.14 Vergleich des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) zwischen den untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Für die Ausgangsvarianten v01 und v02 ergibt sich ein ELD von 3,13 ha/a und 2,43 ha/a. Durch die parametrische Optimierung wird für die Variante v03a (Fernwärme) ein ELD von 1,04 ha/a erreicht, dies entspricht einer Reduktion um 2,09 ha/a (-66,8 %) zu v01 und 1,39 ha/a (-57,2 %) zu v02. Durch die Verwendung von Ökostrom kann der ELD in Variante v03b noch weiter auf 0,50 ha/a reduziert werden. Im Vergleich zu v01 entspricht dies einer Reduktion um 2,63 ha/a (-84,0 %) zu v01 und 1,90 ha/a (-79,4 %) zu v02. Verglichen mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe zeigt sich, dass v04a einen höheren ELD von 1,22 ha/a (im Vergleich zu v03a) und einen geringeren ELD von 0,49 ha/a (im Vergleich zu v03b) aufweist. Sofern kein Ökostrom verwendet wird, resultiert für die Variante mit Fernwärme (v03a) ein geringerer ELD. Wird Ökostrom verwendet, so kann mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe ein geringerer ELD erzielt werden. Dies lässt sich damit begründen, dass sich der Ökostrom auf die Heizung, Kühlung, Beleuchtung und elektronischen Geräte auswirkt. Für die Varianten der Luft-Wasser-Wärmepumpe ergeben sich Differenzen von: 1,91 ha/a (v01 zu v04a), 1,21 ha/a (v02 zu v04b), 2,64 ha/a (v01 zu v04a) und 1,94 ha/a (v02 zu v04b),

7.5.4 Vergleich des spezifischen ökologischen Flächenbedarfs

Der spezifische ökologische Flächenbedarf (ELD^{''}) stellt den auf die Nettogrundfläche (NGF) des Gebäudes bezogenen jährlichen ökologischen Flächenbedarf dar. Das Fallbeispiel weist eine NGF von 1.097 m² auf. Der ELD^{''} gibt an, wie viel ökologische Fläche pro Quadratmeter Nettogrundfläche und Jahr zur natürlichen Bindung der Emissionen benötigt werden. Angegeben wird der ELD^{''} in m²_{ELD}/m²_{NGF}a. Der ELD^{''} für die untersuchten Gebäudevarianten ist unter Berücksichtigung der Nettogrundfläche, gemäß

Kapitel 7.1, in Abbildung 7.15 dargestellt. Für Variante v01 ergibt sich ein ELD" von 26,7 $\text{m}^2_{\text{ELD}}/\text{m}^2_{\text{NGFa}}$. Mithilfe der Optimierungsverfahren kann der ELD" auf 8,9 $\text{m}^2_{\text{ELD}}/\text{m}^2_{\text{NGFa}}$ (v03a), 4,2 $\text{m}^2_{\text{ELD}}/\text{m}^2_{\text{NGFa}}$ (v03b), 10,4 $\text{m}^2_{\text{ELD}}/\text{m}^2_{\text{NGFa}}$ (v04a) und 4,2 $\text{m}^2_{\text{ELD}}/\text{m}^2_{\text{NGFa}}$ (v04b) reduziert werden.

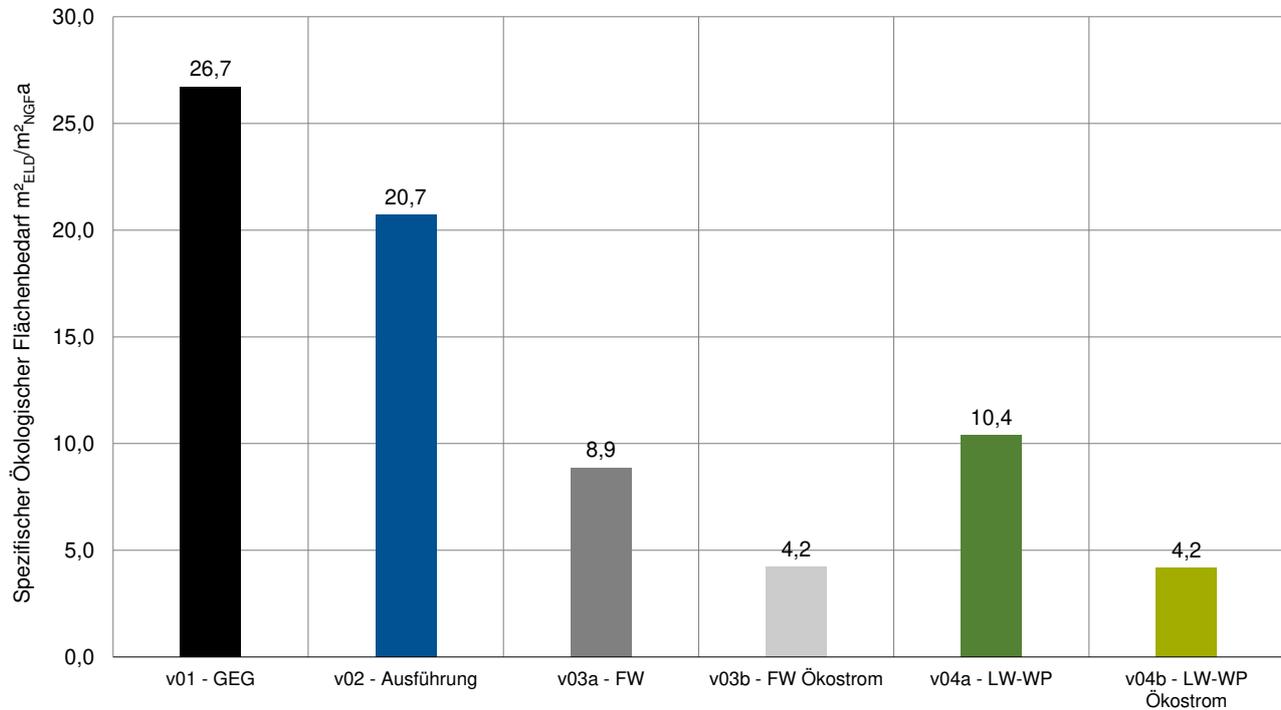


Abbildung 7.15 Vergleich des spezifischen ökologischen Flächenbedarfs (ELD") für die verschiedenen untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Des Weiteren ist in Abbildung 7.16 auf Seite 123 der ELD" im Vergleich zum Gebäude und der umliegenden Infrastruktur dargestellt. Die Flächen dienen zur Einordnung zwischen ELD und der Gebäudegrundfläche.



Abbildung 7.16 Visuelle Darstellung des spezifischen ökologischen Flächenbedarfs (ELD") für die verschiedenen untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (Quelle: [222]; leicht modifiziert)

Die einzelnen Ergebnisse zu den Varianten der Fernwärme sind in Kapitel 7.5.5 und zur Wärmepumpe in Kapitel 7.5.6 dargestellt.

7.5.5 Ergebnisse Fernwärme

Im Folgenden werden für die Gebäudevarianten v03a und v03b die einzelnen optimierten Gebäudeparameter, die daraus resultierenden Umweltwirkungen (GWP, AP und EP) und abschließend die Ergebnisse der optimierten ELDs erläutert.

Optimierte Gebäudeparameter

In Tabelle 7.16 auf Seite 124 sind die Ergebnisse der parametrischen Optimierung für die Varianten v03a und v03b dargestellt. Basierend auf den Ergebnissen ergeben sich Wärmedämmstoffdicken von 0,06 m (v03a) und 0,08 m (v03b). Für das Dach ergeben sich Dicken von 0,04 m (v03a) und 0,05 m (v03b). Diese Werte liegen deutlich unterhalb derer von v01 und v02. Die verhältnismäßig geringen Dämmstoffdicken im Vergleich zu v01 und v02 lassen sich anhand des verwendeten Datensatzes für Fernwärme begründen. Verwendet wird der Datensatz „Fernwärme aus Biomasse“ gemäß der ÖKOBAUDAT, welcher pro kWh Endenergie ein GWP von 0,01153 kg CO₂-Äq. aufweist. Dies führt in der Nutzungsphase zu geringen Emissionen, wobei Reduktionspotenziale durch zusätzliche Wärmedämmung nicht zielführend sind, da die grauen Emissionen das Einsparpotenzial überschreiten. Zu beachten ist jedoch, dass der Endenergiebedarf durch einen höheren Wärmedämmstandard reduziert werden kann. Diese Thematik und die multikriterielle Bewertung hinsichtlich Energiebedarf und ökologischer Flächenbedarf wird in Kapitel 7.5.7 aufgegriffen und diskutiert. Des Weiteren zeigt sich für v03a eine deutlich größere Fläche

für die Solarthermie- und Photovoltaikanlagen. Dadurch, dass in v03b Ökostrom verwendet wird und dementsprechend die Emissionen gering sind, kann durch eine PV-Anlage keine Reduktion erreicht werden, weshalb die Optimierung keine Fläche für die PV-Anlage ausgibt.

Tabelle 7.16 Gegenüberstellung der Gebäudeparameter zwischen den Vergleichsvarianten v01 (GEG), v02 (Ausführung) und den beiden optimierten Gebäudevarianten v03a (FW) und v03b (FW mit Ökostrom)

Parameter	v01	v02	v03a	v03b
d_WD_AW	0,10 m	0,18 m	0,06 m	0,08 m
d_WD_DA	0,18 m	0,24 m	0,04 m	0,05 m
d_WD_G	0,04 m	0,12 m	0,02 m	0,02 m
U _g	1,30 W/m ² K	1,30 W/m ² K	0,60 W/m ² K	0,60 W/m ² K
F _c	0,15	0,15	0,15	0,15
g	0,60	0,60	0,30	0,65
A _{PV}	-	100 m ²	129 m ²	0 m ²
W _{PV}	-	25°	40°	-
O _{PV}	-	90°	-20°	-
A _{ST}	-	-	0 m ²	0 m ²
W _{ST}	-	-	-	-
O _{ST}	-	-	-	-

Treibhauspotenzial GWP

In Abbildung 7.17 auf Seite 125 sind die Ergebnisse für das GWP der Fernwärmevarianten dargestellt. Für die Variante v03a ergibt sich ein GWP von 492.758 kg CO₂-Äq. und für v04b ein GWP von 229.069 kg CO₂-Äq. Dies entspricht einer Differenz von 263.689 kg CO₂-Äq. und einer prozentualen Reduktion um 53,5 %. In Bezug auf die Vergleichsvarianten ergeben sich für v03a Differenzen von 1.030.313 kg CO₂-Äq. zu v01 und 670.425 kg CO₂-Äq. zu v02. Die Differenzen erhöhen sich unter Berücksichtigung von Ökostrom in v03b auf 1.294.002 kg CO₂-Äq. zu v01 und 934.112 kg CO₂-Äq. zu v02. Die größten Unterschiede zeigen sich bei der BK, Nutzung, Entsorgung der BK und dem Recyclingpotenzial. Da die BK in v03a und v03b maßgeblich aus Holzbaustoffen besteht, ergibt sich für die Herstellungsphase ein negatives GWP von -121.642 kg CO₂-Äq. (v03a) und -120.845 kg CO₂-Äq. (v03b). Durch das gebundene CO₂ dient das Gebäude in beiden Varianten somit als CO₂-Speicher. Für beide Varianten ergeben sich untereinander keine großen Differenzen, wie zuvor bei den optimierten Gebäudeparametern festgestellt. Im Vergleich mit den Ausgangsvarianten ergeben sich mögliche Umweltentlastungspotenziale von etwa -378.104 kg CO₂-Äq. (v01 zu v03b) bis -386.986 kg CO₂-Äq. (v01 zu v03a). Für die Nutzungsphase ergibt sich ein GWP von 1.155.577 kg CO₂-Äq. (v03a) und 16.850 kg CO₂-Äq. (v03b). Dieser gravierende Unterschied lässt sich auf den Ökostrom in Variante v03b zurückführen. Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass die relativen Anteile der BK am Gesamt GWP steigen. Die Entsorgung der BK in v03a ist für 56,1 % der gesamten Emissionen verantwortlich, während der Anteil bei v03b bei 120,2 % liegt. Die detaillierten absoluten Werte sind dem Anhang A, Tabelle A.1 auf Seite 191 zu entnehmen.

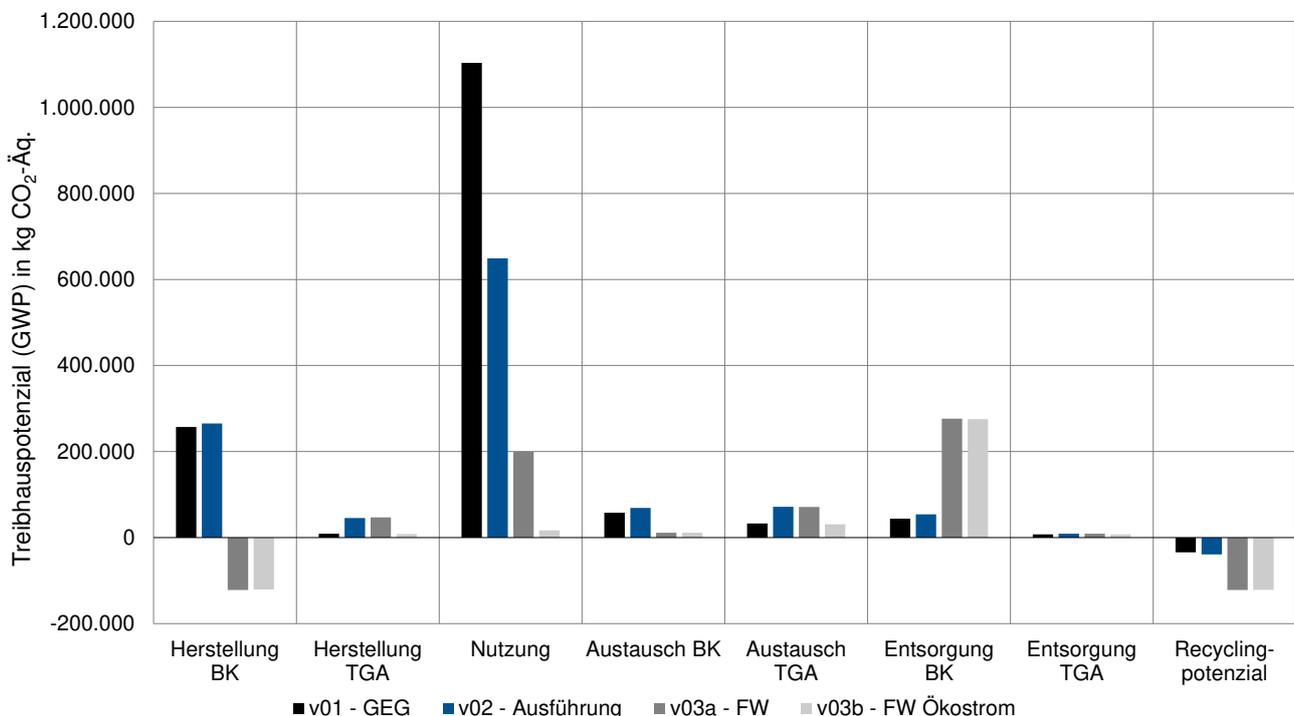


Abbildung 7.17 Verteilung des Treibhauspotenzials (GWP) in kg CO₂-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v03a und v03b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Versauerungspotenzial AP

In Abbildung 7.18 auf Seite 126 sind die Ergebnisse für das AP dargestellt. Für Variante v03a ergibt sich dabei ein gesamtes AP von 1.449 kg SO₂-Äq. und für Variante v03b von 818 kg SO₂-Äq. Der Vergleich mit den Ausgangsvarianten zeigt keine großen Unterschiede. Die Werte für AP liegen hierbei nahe beieinander. Das AP der Nutzungsphase beträgt in v03a insgesamt 624 kg SO₂-Äq. und in v04b 295 kg SO₂-Äq. Hinsichtlich der TGA zeigen sich Unterschiede in Herstellung und Austausch. Dies lässt sich durch die PV-Anlage in v03a begründen. Variante v03a weist ein gesamtes AP der TGA (Herstellung, Austausch und Entsorgung) von 345 kg SO₂-Äq. und Variante v03b 47 kg SO₂-Äq. auf. Bezogen auf die Gesamtemissionen von Variante v03a betragen die relativen Anteile für die BK 33,1 %, Nutzung 43,0 % und TGA 16,6 %. Für Variante v03b ergeben sich relativen Anteile von: BK 58,4 %, Nutzung 36,0 % und TGA 5,1 %. Die Ergebnisse sind in ihrer Gesamtheit dem Anhang A, Tabelle A.2 auf Seite 191 zu entnehmen.

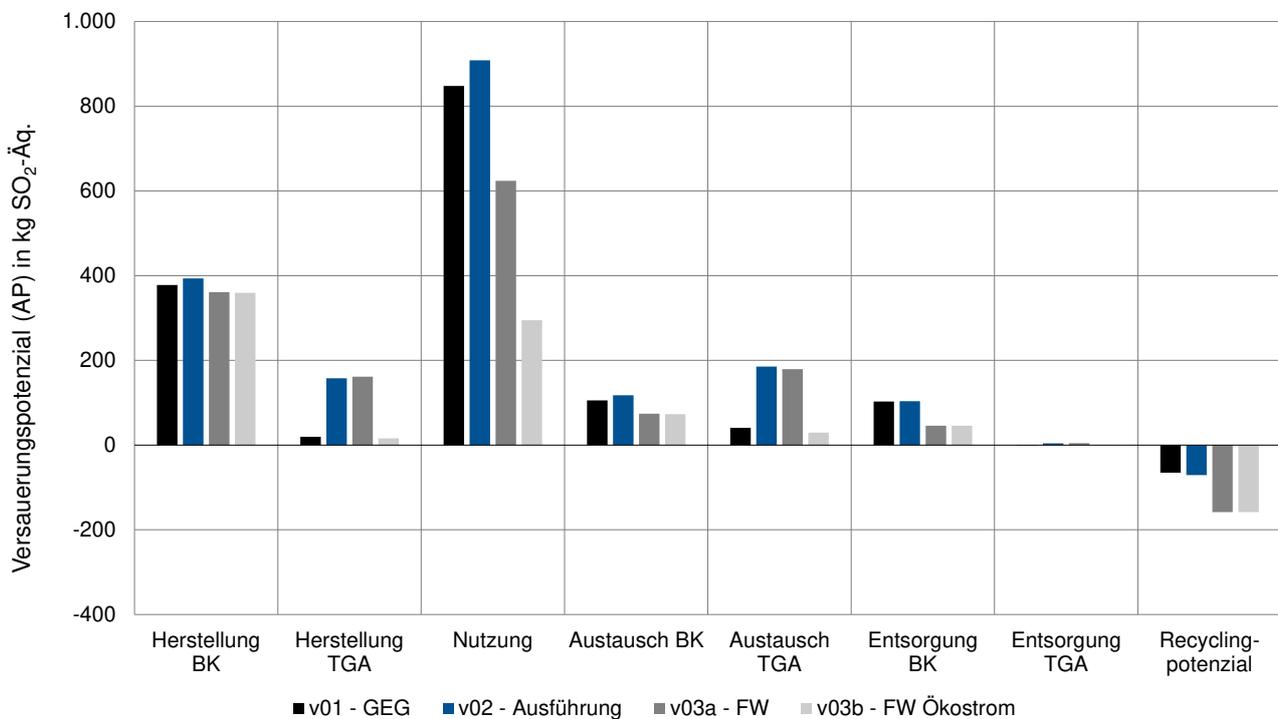


Abbildung 7.18 Verteilung des Versauerungspotenzials (AP) in kg SO₂-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v03a und v03b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Eutrophierungspotenzial EP

Die Ergebnisse zum EP sind in Abbildung 7.19 auf Seite 127 dargestellt. Das gesamte EP beträgt bei Variante v03a insgesamt 323 kg Phosphat-Äq. und bei v03b insgesamt 226 kg Phosphat-Äq. In beiden Fällen entfällt auf die Nutzungsphase der größte Anteil. In Variante v03a beträgt dieser 156 kg Phosphat-Äq. und bei v03b 83 kg Phosphat-Äq. Dies entspricht relativen Anteilen von 48,2 % und 36,94 %. Die gravierendsten Unterschiede zu den Vergleichsvarianten ergeben sich in der Herstellung der BK, der Nutzungsphase und der Entsorgung der BK. Die BK aus nachwachsenden Rohstoffen weist im Vergleich zu den mineralischen Bauweisen in der Herstellung höhere Phosphat-Emissionen auf. In der Entsorgung liegen die Werte der Vergleichsvarianten höher, was dazu führt, dass über den gesamten Lebenszyklus das EP in allen vier Varianten nahezu identisch ist. Erst durch die Verwendung von Ökostrom ist in der Nutzungsphase ein Umweltentlastungspotenzial identifizierbar. Die gesamten Ergebnisse sind detailliert im Anhang A, Tabelle A.3 aufgelistet.

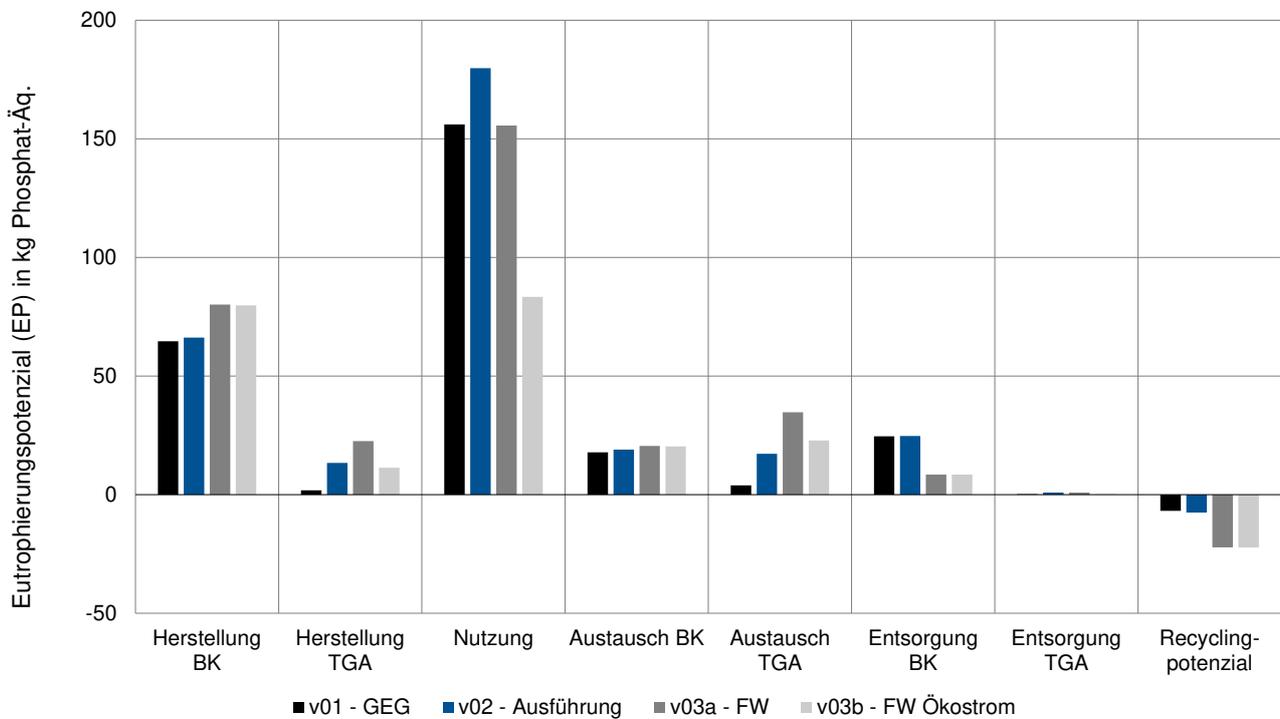


Abbildung 7.19 Verteilung des Eutrophierungspotenzials (EP) in kg Phosphat-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v03a und v03b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Optimierter ökologischer Flächenbedarf

Variante v03a

Der ELD für Variante v03a ist in Abbildung 7.20 dargestellt. Der ELD beträgt in dieser Variante insgesamt 1,046 ha/a, was einer Reduktion zu v01 um 2,079 ha/a (-67 %) und zu v02 um 1,379 ha/a (-57 %) entspricht. Der größte Anteil entfällt auf das Ökosystem Wald mit einem Flächenbedarf für GWP von 0,656 ha/a, für AP von 0,449 ha/a und EP 0,135 ha/a. Dies entspricht im Vergleich zur Variante v01 einer Differenz für GWP von -1,356 ha/a, für AP um -0,015 ha/a und einer Erhöhung für EP von 0,0232 ha/a. Diese Erhöhung des ELD für EP ist durch den höheren Anteil des ELD für GWP erklärbar, da dieser im Rahmen der Optimierung für den gesamten ELD relevant ist. Des Weiteren ergibt sich beim Grünland ein ELD für GWP von 0,312 ha/a, für AP von 0,267 ha/a und für EP von 0,022 ha/a. Hierbei zeigt auch, dass der Unterschied zwischen GWP und AP deutlich geringer ist als bei v01 und v02. In allen Ökosystemen ist der individuelle ELD für GWP der größte, allerdings nimmt der Anteil für AP und EP bei den optimierten Varianten deutlich zu.

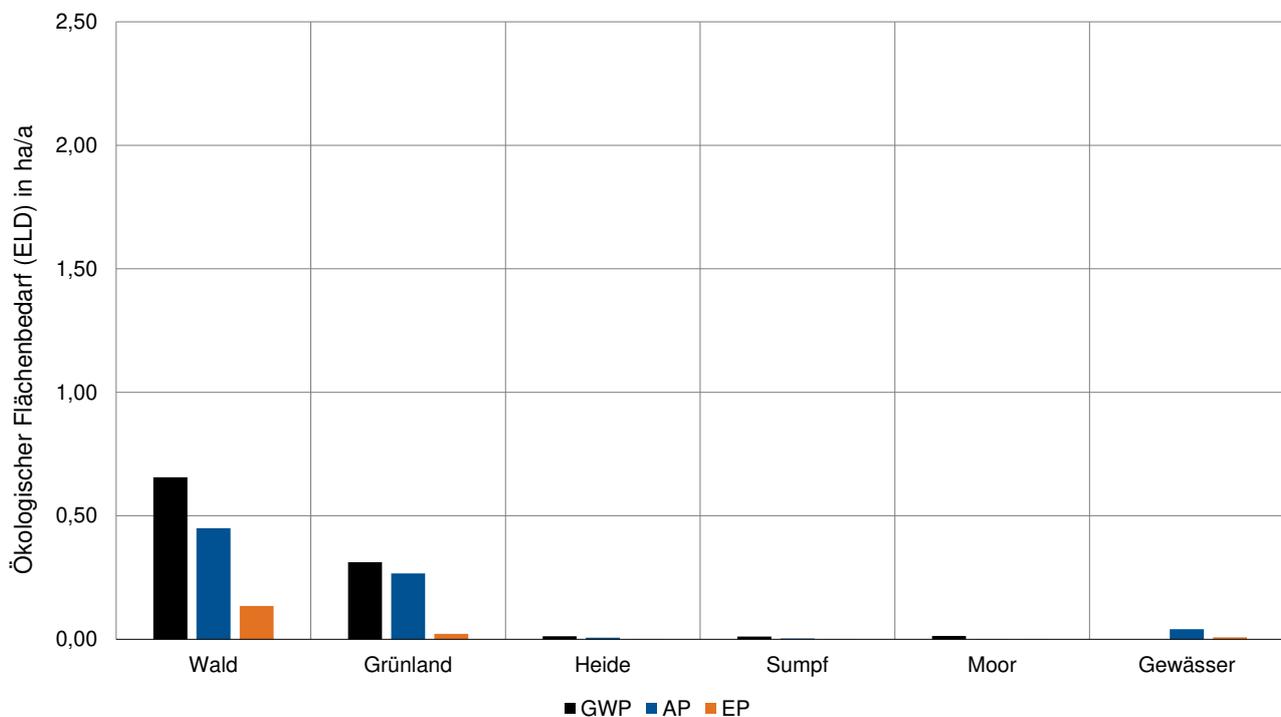


Abbildung 7.20 Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe (ELD) auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v03a (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Variante v03b

In Abbildung 7.21 auf Seite 129 ist der ELD für Variante v03b dargestellt. In Summe ergibt sich ein ELD von 0,496 ha/a. Im Vergleich zu v01 und v02 ergibt sich eine Differenz von 2,629 ha/a und 1,929 ha/a. Des Weiteren zeigt sich, dass der größte Anteil am ELD das Ökosystem Wald mit 0,305 ha/a umfasst. Darüber hinaus ergibt sich beim Grünland ein ELD für GWP von 0,145 ha/a, für AP von 0,151 ha/a und für EP von 0,015 ha/a. Hierbei zeigt sich, dass der ELD für AP höher ist als für GWP. Für das Ökosystem Grünland ist in diesem Fall das AP von größerer Bedeutung als das GWP.

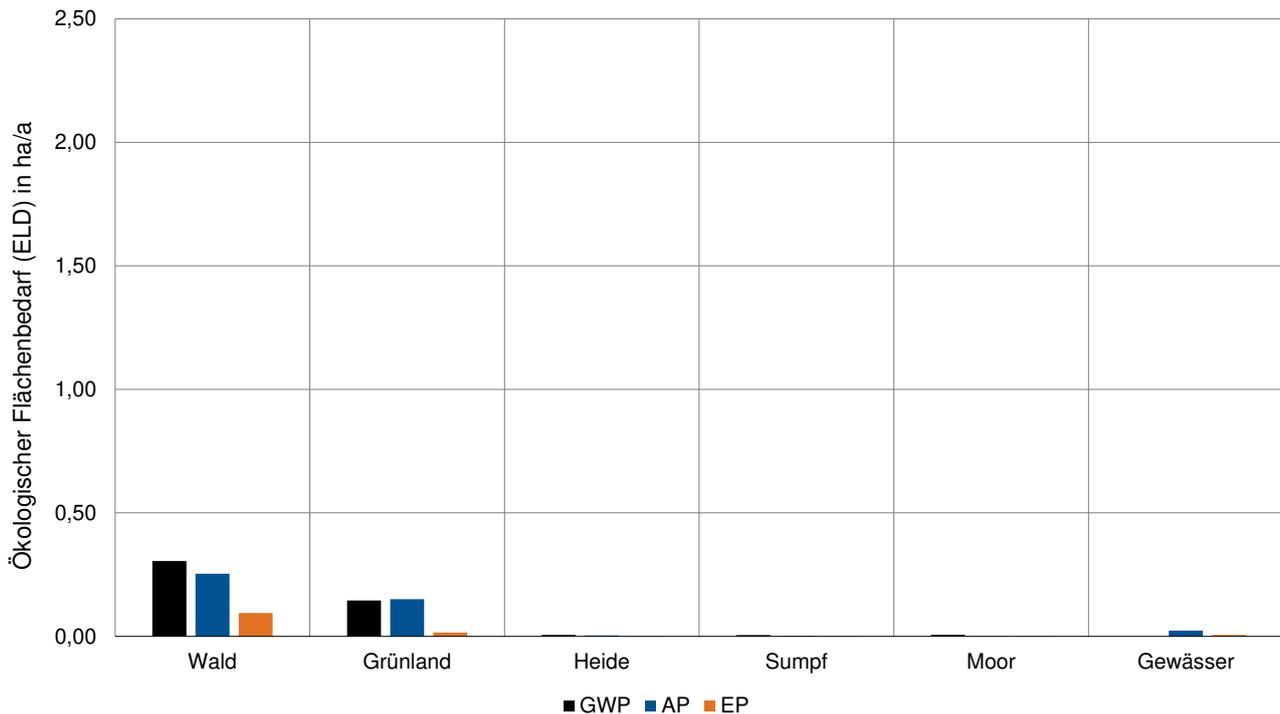


Abbildung 7.21 Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe (ELD) auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v03b (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

7.5.6 Ergebnisse Luft-Wasser-Wärmepumpe

Im Folgenden werden für die Gebäudevarianten v04a und v04b die einzelnen optimierten Gebäudeparameter, die daraus resultierenden Umweltwirkungen (GWP, AP und EP) und abschließend die Ergebnisse der optimierten ELDs erläutert.

Optimierte Gebäudeparameter

Die Ergebnisse zu den Gebäudeparametern aus den parametrischen Optimierungen und den Vergleichsvarianten sind in Tabelle 7.17 auf Seite 130 dargestellt. Es zeigt sich, dass in Variante v04a die Dicken der Wärmedämmungen für die Außenwand und das Dach deutlich oberhalb der Vergleichsvariante (v01) und der Ausführungsvariante (v02) liegen. Die Wärmedämmung der Außenwand weist eine Dicke von 0,32 m und die des Dachs 0,28 m auf. Des Weiteren zeigen sich starke Abweichungen hinsichtlich der Vergleichsvarianten. So sind die Flächen für die Solarthermie- und Photovoltaikanlagen deutlich größer. Dies lässt sich im Falle der Variante v04a auf den hohen Strombedarf in der Gebäudenutzung zurückführen. Für Variante v04b zeigt sich für die Dicken der Wärmedämmungen, dass alle auf das Minimum der möglichen Spannweite von 0,02 m optimiert wurden. Dies lässt sich damit begründen, dass in dieser Variante die Wärmepumpe mit Ökostrom betrieben wird. Der hier verwendete Datensatz für „Strom aus Wasserkraft“ gemäß der ÖKOBAUDAT weist pro kWh Endenergie ein GWP von 0,00595 kg CO₂-Äq. auf. Dies führt zu geringen CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase, wobei die Reduktionspotenziale durch eine dickere Wärmedämmung durch die grauen Emissionen in dem zusätzlichen Materialaufwand aufgehoben werden. Hinsichtlich der CO₂-Emissionen ist es daher nicht zielführend, dickere Wärmedämmungen umzusetzen. In Bezug auf den Endenergiebedarf würde ein höherer Wärmedämmstandard jedoch zu einer Reduktion des-

sen führen. Diese Thematik und die multikriterielle Bewertung hinsichtlich Energiebedarf und ökologischer Flächenbedarf wird im Kapitel 7.5.7 aufgegriffen und diskutiert.

Tabelle 7.17 Gegenüberstellung der Gebäudeparameter zwischen den Vergleichsvarianten v01 (GEG), v02 (Ausführung) und den optimierten Gebäudevarianten v04a (LW-WP) und v04b (LW-WP mit Ökostrom)

Parameter	v01	v02	v04a	v04b
d_WD_AW	0,10 m	0,18 m	0,32 m	0,02 m
d_WD_DA	0,18 m	0,24 m	0,28 m	0,02 m
d_WD_G	0,04 m	0,12 m	0,02 m	0,02 m
U _g	1,30 W/m ² K	1,30 W/m ² K	0,60 W/m ² K	0,60 W/m ² K
F _c	0,15	0,15	0,15	0,15
g	0,60	0,60	0,30	0,30
A _{PV}	-	100 m ²	143 m ²	0 m ²
W _{PV}	-	25°	45°	-
O _{PV}	-	90°	-20°	-
A _{ST}	-	-	15 m ²	0 m ²
W _{ST}	-	-	60°	-
O _{ST}	-	-	-20°	-

Treibhauspotenzial GWP

Für die Luft-Wasser-Wärmepumpe sind in Abbildung 7.22 auf Seite 131 die Ergebnisse für das GWP dargestellt. Für Variante v04a ergibt sich über den gesamten Lebenszyklus ein GWP von 589.081 kg CO₂-Äq. und für v04b ein GWP von 233.357 kg CO₂-Äq. Dies entspricht einer Differenz von 345.724 kg CO₂-Äq. und einer prozentualen Reduktion um 59,7 %. Verglichen mit den Varianten v01 und v02 ergeben sich Differenzen von -857.947 kg CO₂-Äq. zu v01 und -403.229 kg CO₂-Äq. zu v02. Wird die Wärmepumpe mit Ökostrom (v04b) betrieben, so erhöhen sich die Differenzen auf -1.094.951 kg CO₂-Äq. im Vergleich zu v01 und -640.233 kg CO₂-Äq. verglichen mit v02. Hinsichtlich der BK ergibt sich aufgrund des hohen Anteils an erneuerbaren Ressourcen für die Herstellungsphase ein negatives GWP von -165.901 kg CO₂-Äq. (v04a) und -109.671 kg CO₂-Äq. (v04b). Über den Lebenszyklus dient das Gebäude in beiden Varianten somit als CO₂-Speicher. Der geringere Wert für v04b lässt sich durch die geringeren Wärmedämmstoffdicken und den dadurch resultierenden geringeren grauen Emissionen erklären. Dementsprechend sind auch die CO₂-Emissionen aus der Entsorgungsphase für die BK in v04b geringer als in v04a. Hierbei ergibt sich ein GWP von 339.323 kg CO₂-Äq. (v04a) und 267.758 kg CO₂-Äq. (v04b). Im direkten Vergleich mit den mineralischen Bauweisen aus v01 und v02 ergeben sich Reduktionspotenziale zwischen -366.930 kg CO₂-Äq. (v02 zu v04b) und -431.263 kg CO₂-Äq. (v01 zu v04b). Die Nutzungsphase umfasst in v04a insgesamt 245.668 kg CO₂-Äq. und in v04b 8.663 kg CO₂-Äq. Dieser gravierende Unterschied lässt sich auf den Ökostrom in Variante v04b zurückführen. Dadurch, dass die Nutzungsphase in Variante v04b so geringes GWP aufweist, ist ein Wechsel in den relativen Anteilen am Gesamt GWP erkennbar. In v04a umfasst die BK

für die Lebenszyklusphasen Herstellung, Austausch und Entsorgung insgesamt 190.807 kg CO₂-Äq., was einem relativen Anteil von rund 33 % entspricht. Die Nutzungsphase umfasst 42,4 % und die Komponenten der TGA 24,6 %. In v04b steigt der Anteil der BK auf 74 %. Die Nutzungsphase umfasst 3,7 % und die TGA insgesamt 22,2 %. Des Weiteren zeigt sich, dass die Entsorgungsphase der BK an Bedeutung gewinnt. Es lässt sich ableiten, dass in Bezug auf die Treibhausgasemissionen (THG), die Weiterverwendung von Bauteilen und Materialien für die Varianten v04a und v04b zukünftiges Potenzial in der weiteren Reduktion der THG liegt. In Ergänzung zu einem Wechsel auf eine erneuerbare Energieerzeugung stellt anschließend die Kreislaufwirtschaft ein weiteres Potenzial dar.

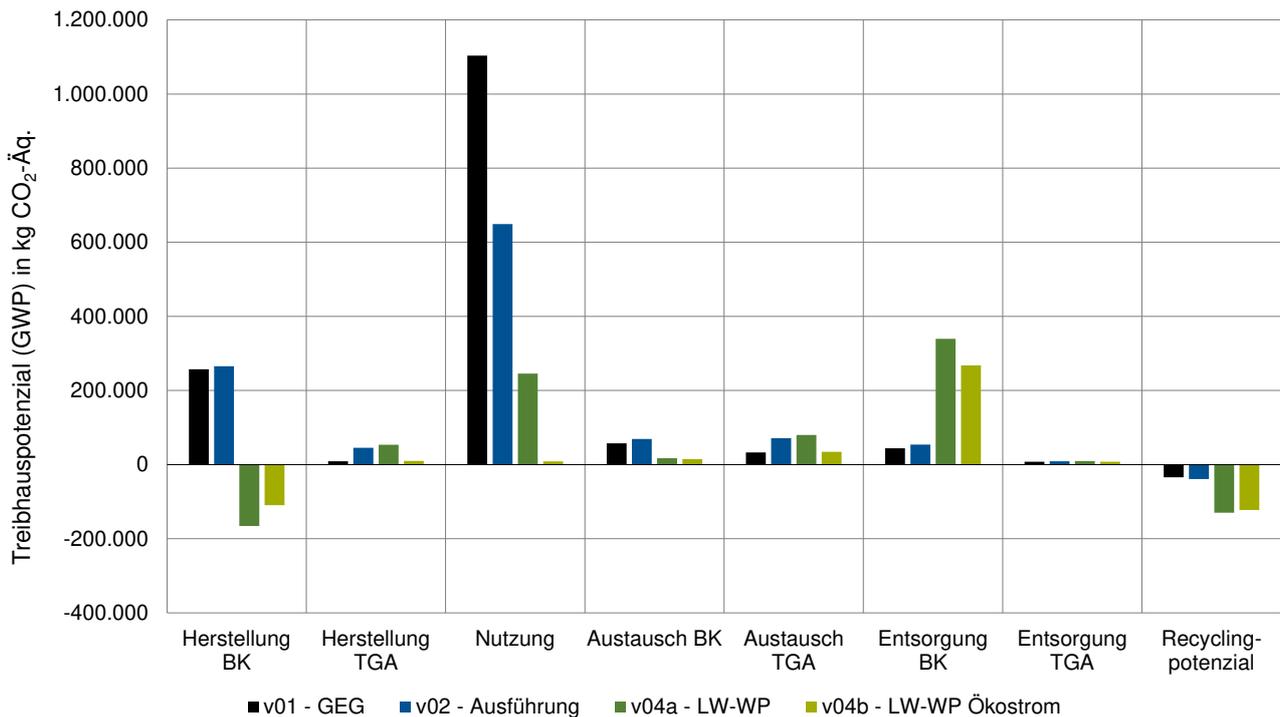


Abbildung 7.22 Verteilung des Treibhauspotenzials (GWP) in kg CO₂-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v04a und v04b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Die detaillierten absoluten Werte und die jeweiligen Standardabweichungen zu den optimierten Varianten v04a und v04b sind getrennt nach den Lebenszyklusphasen und den betrachteten Komponenten im Anhang A in Tabelle A.6 dargestellt.

Versauerungspotenzial AP

Die Ergebnisse für das AP sind in Abbildung 7.23 auf Seite 132 dargestellt. Für Variante v04a ergibt sich ein gesamtes AP von 1.354 kg SO₂-Äq. und für Variante v04b von 556 kg SO₂-Äq. Dies entspricht einer Differenz von 789 kg SO₂-Äq. respektive einer prozentualen Differenz von -58,9 %. Verglichen mit den Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung) zeigen sich in Bezug auf die Herstellung der BK keine gravierenden Unterschiede. Im Vergleich zur Variante v01 und v02 liegen die Emissionen für AP von Variante v04a höher. Die Werte für Variante v04b liegen leicht unterhalb von v01. Unter Berücksichtigung der Lebenszyklusphasen Herstellung, Austausch und Entsorgung ergibt sich ein relativer Anteil von 43,4 % (v04a) und 84,4 % (v04b). Im Vergleich zu den Varianten v01 und v02 (siehe Kapitel 7.3.2) sind die Anteile

bei Variante v04a um 4,5 % respektive 10,6 % gestiegen. Für Variante v04b ergibt sich ein Anstieg um 45,5 % beziehungsweise 51,6 %. Die Nutzungsphase umfasst in v04a insgesamt 24,4 % und in v04b lediglich 1,7 %. Die Verwendung von erneuerbaren Energieträgern trägt somit zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen bei. In Bezug auf die Komponenten der TGA ergibt sich in Variante v04a ein Anteil von insgesamt 31 % und in Variante v04b 13,7 %. Bei der Herstellung der TGA zeigt sich, dass v02 und v04a deutlich höhere Werte als v01 und v04b aufweisen. Dies lässt sich durch die Solarthermie- und Photovoltaikanlage begründen. Dies gilt äquivalent auch für den Austausch der TGA. Bei den anderen beiden Varianten ist diese nicht vorhanden. Deutliche Unterschiede zeigen sich bei der Nutzungsphase. Die Variante v01 weist hier insgesamt 848 kg SO₂-Äq. und Variante v02 908 kg SO₂-Äq. auf. Durch die Verwendung einer erneuerbaren Energieversorgung kann hier in Bezug auf v01 eine Reduktion in v04a um 504 kg SO₂-Äq. (-41 %) und v04b um 838 kg SO₂-Äq. (-99 %) erreicht werden.

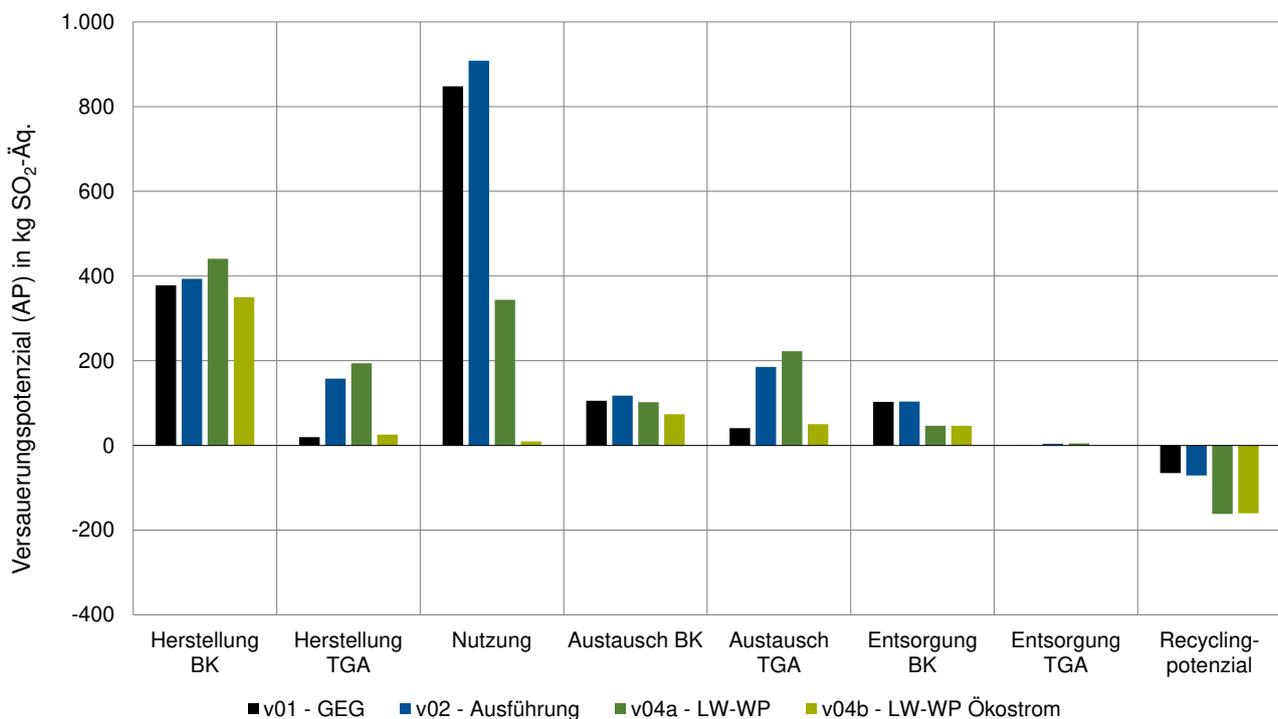


Abbildung 7.23 Verteilung des Versauerungspotenzials (AP) in kg SO₂-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v04a und v04b) (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Die absoluten Werte hinsichtlich des AP sind getrennt nach Lebenszyklusphase und betrachteter Komponente im Anhang A in Tabelle A.7 auf Seite 194 dargestellt.

Eutrophierungspotenzial EP

Die Gesamtergebnisse zum EP sind in Abbildung 7.24 auf Seite 133 dargestellt. Das gesamte EP beträgt bei Variante v04a über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren insgesamt 238 kg Phosphat-Äq. und für v04b insgesamt 116 kg Phosphat-Äq. Den größten Anteil an den Emissionen trägt die Herstellung der BK mit 98 kg Phosphat-Äq. bei v04a und 77 kg Phosphat-Äq. bei v04b. Dies entspricht relativen Anteilen von 41,3 % und 66,4 %. Unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus inklusive des Austausches und der Entsorgung der BK erhöhen sich die Emissionen auf 134 kg Phosphat-Äq. für v04a. Dies entspricht

einem relativen Anteil von 56,2 %. Bei Variante v04b verursacht der Lebenszyklus der BK insgesamt 105 kg Phosphat-Äq., was einem Anteil von 90,7 % entspricht. Der Vergleich mit der Variante v01 (GEG) zeigt, dass die Emissionen zum EP in der Herstellung der BK in beiden Varianten v04a und v04b höher sind. Wie bereits beim AP festgestellt, weisen nachwachsende Materialien hierbei keine Vorteile auf. Es zeigt sich allerdings, dass die erneuerbare Energieversorgung durch die Luft-Wasser-Wärmepumpen deutlich geringere EP aufweist als der Gas-Brennwertkessel aus v01. Die Nutzungsphase weist Emissionen von insgesamt 68 kg Phosphat-Äq. bei Variante v04a auf, dies entspricht einem Anteil von 28,6 %. Bei Variante v04a weisen die Komponenten der TGA den drittgrößten Anteil mit 15,5 % auf.

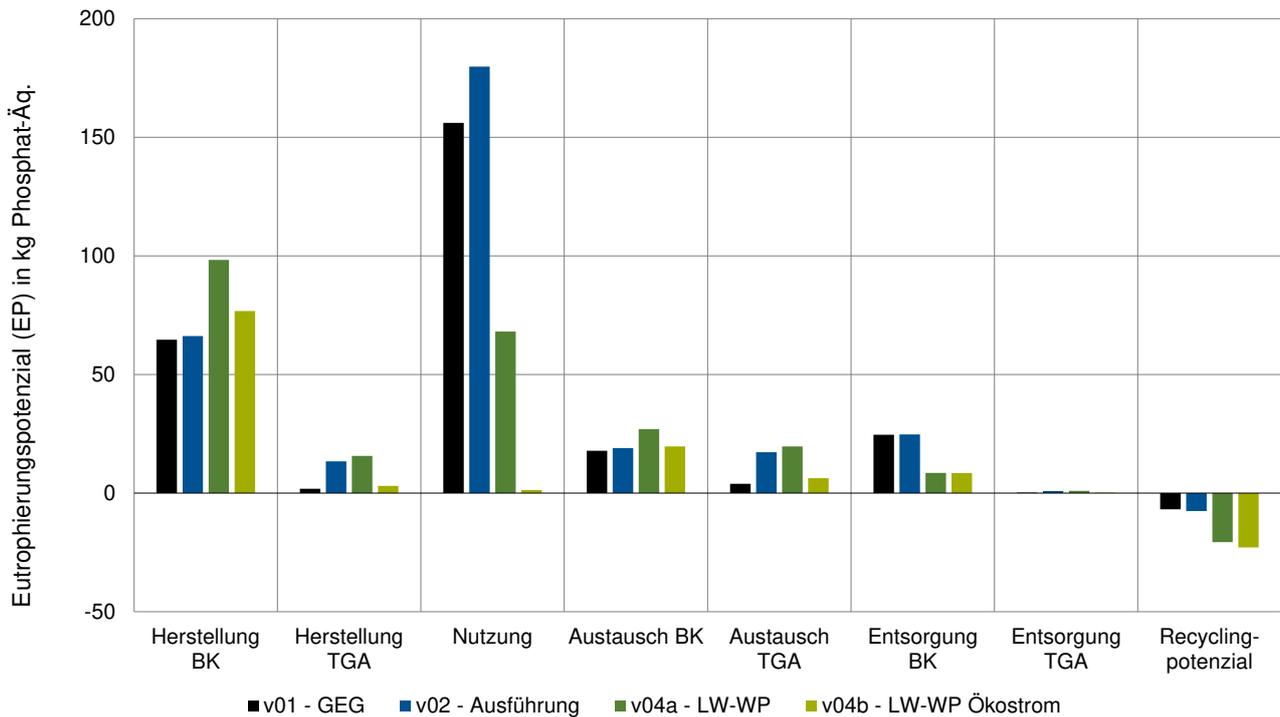


Abbildung 7.24 Verteilung des Eutrophierungspotenzials (EP) in kg Phosphat-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v04a und v04b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)

Die absoluten Werte hinsichtlich des EP und die Standardabweichungen sind getrennt nach Lebenszyklusphase und betrachteter Komponente im Anhang A in Tabelle A.8 auf Seite 194 dargestellt.

Optimierter ökologischer Flächenbedarf

Variante v04a

Basierend auf den optimierten Gebäudeparametern und den sich daraus ergebenden Umweltwirkungen des Fallbeispiels ergeben sich für die Variante v04a folgende ökologische Flächenbedarfe (siehe Abbildung 7.25). Für die optimierte Gebäudevariante resultiert ein gesamter ELD von 1,219 ha/a. Für das Ökosystem Wald ergeben sich Flächenbedarfe für das GWP von 0,771 ha/a, für AP von 0,420 ha/a und EP 0,100 ha/a. Dies entspricht im Vergleich zur Variante v01 eine Reduktion von 1,241 ha/a (GWP), 0,044 ha/a (AP) und 0,002 ha/a. (EP). Wie bereits bei den Ergebnissen zu den Umweltindikatoren festgestellt, sind keine signifikanten lebenszyklusbasierten Optimierungen hinsichtlich AP und EP feststellbar. Dies zeigt sich auch bei den einzelnen Flächenbedarfen. Zwar stellt auch bei Variante v04a das GWP den größten individuellen Flächenbedarf bei Wald dar, allerdings steigt der relative Anteil bei AP von 23,1 % (v01) auf 67,8 %. Bei Grünland ergibt sich ein ELD für GWP von 0,367 ha/a., für AP von 0,239 ha/a. und für EP von 0,016 ha/a. In Bezug zur Vergleichsvariante (v01) ergibt sich eine Reduktion um 0,59 ha/a (GWP), 0,026 ha/a (AP) und 0,002 ha/a (EP). Hinsichtlich des Grünlands steigt der relative Anteil von AP von 28,7 % (v01) auf 67,8 %. Zusammenfassend zeigt sich, dass bei allen Ökosystemen eine Reduktion des ELD zu erkennen ist. Des Weiteren zeigt sich, dass alle weiteren ELD sehr geringe absolute Werte unterhalb von 0,016 ha/a aufweisen.

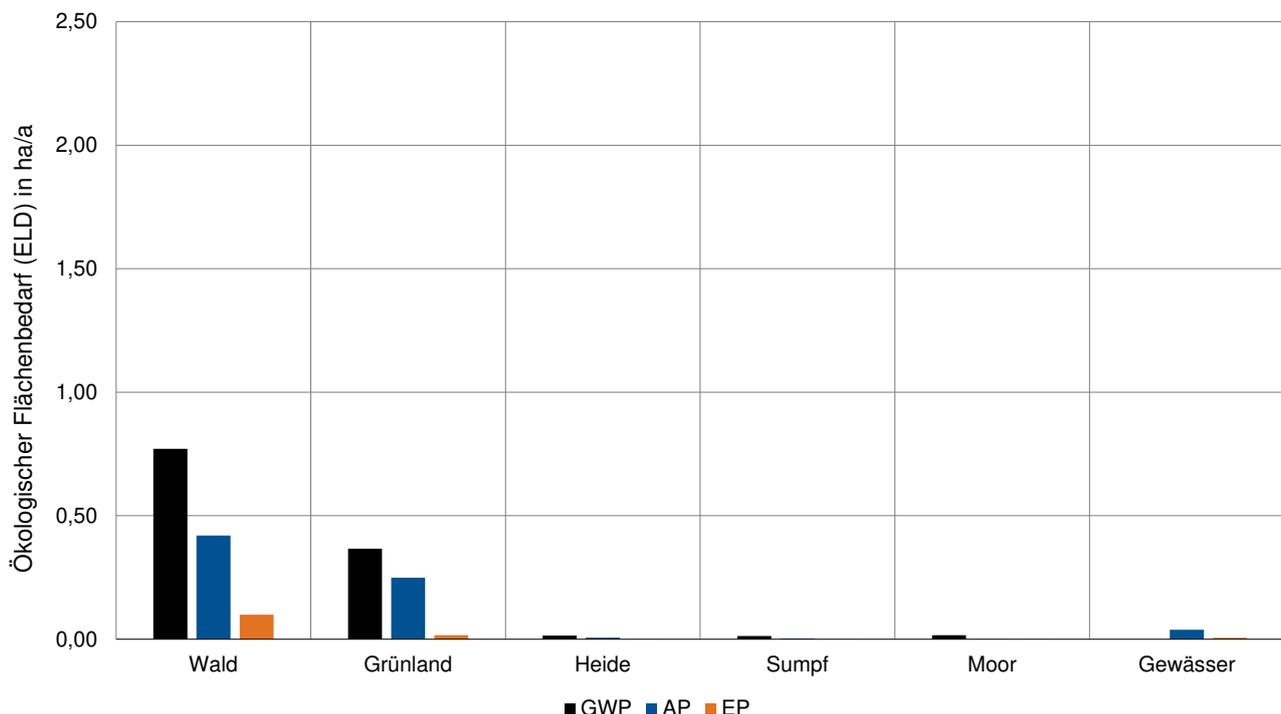


Abbildung 7.25 Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe ELD auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v04a (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Die spezifischen ELD für die betrachteten Ökosysteme und Umweltindikatoren sind im Anhang A in Tabelle A.9 auf Seite 195 aufgelistet.

Variante v04b

In Abbildung 7.26 sind die ELD für die betrachteten Ökosysteme und Wirkungskategorien der Variante v04b dargestellt. Für diese Variante ergibt sich ein gesamter ELD von 0,492 ha/a. Im direkten Vergleich zu Variante v04a kann durch die Nutzung von Ökostrom der ELD von 1,219 ha/a um 0,727 ha/a reduziert werden. Den größten Anteil am gesamten ELD entfällt dabei auf das Ökosystem Wald. Für den Wald ergeben sich ELD von 0,311 ha/a (GWP), 0,172 ha/a (AP) und 0,048 ha/a (EP). Dies entspricht im Vergleich zur Variante v01 einer Reduktion von 1,701 ha/a (GWP), 0,292 ha/a (AP) und 0,064 ha/a (EP). Wie bereits bei den Ergebnissen zu den Umweltindikatoren festgestellt, sind keine signifikanten lebenszyklusbasierten Optimierungen hinsichtlich AP und EP feststellbar. Dies zeigt sich auch bei den einzelnen Flächenbedarfen. Zwar stellt auch bei Variante v04a das GWP den größten individuellen Flächenbedarf bei Wald dar, allerdings steigt der relative Anteil bei AP von 23,1 % (v01) auf 55,3 %. Bei Grünland ergibt sich ein ELD für GWP von 0,148 ha/a., für AP von 0,102 ha/a. und für EP von 0,008 ha/a. Im Vergleich zur Variante v01 ergibt sich eine Reduktion um 0,809 ha/a (GWP), 0,173 ha/a (AP) und 0,010 ha/a (EP). Hinsichtlich des Grünlands steigt der relative Anteil von AP von 28,7 % (v01) auf 68,9 %. Zusammenfassend zeigt sich, dass bei allen Ökosystemen eine Reduktion des ökologischen Flächenbedarfs durch die Optimierung der Gebäudeparameter zu erkennen ist.

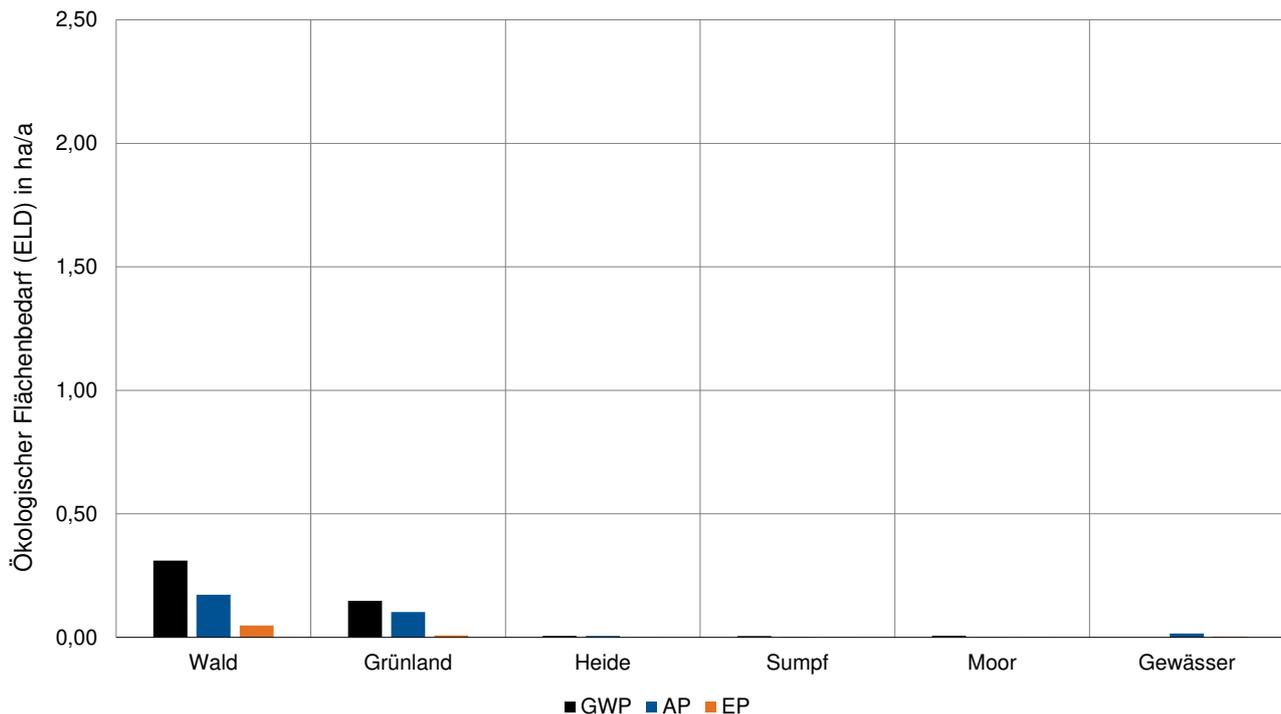


Abbildung 7.26 Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe ELD auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v04b (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Die detaillierten Einzelwerte der ELD unter Berücksichtigung der verschiedenen Ökosysteme und betrachteten Wirkungskategorien sind im Anhang A, Tabelle A.10 auf Seite 195 aufgelistet.

7.5.7 Vergleich des Endenergiebedarfs mit dem ökologischen Flächenbedarf

Dieses Kapitel dient dazu, den ELD anhand des Endenergiebedarfs einzuordnen und die optimierten Parameter aus Kapitel 7.5.6 und Kapitel 7.5.5 zu erläutern. Wie in Kapitel 6.2.2, Formel 6.1 dargestellt, beinhalten die gesamten Umweltwirkungen, auf denen der ELD basiert, unter anderem die Umweltwirkungen der BK, die der TGA und die der Nutzungsphase. Wenn im Rahmen der Optimierung der Wärmedämmstandard erhöht wird, dann steigen die Umweltwirkungen der BK bei gleichzeitiger Reduktion der Umweltwirkungen der Nutzungsphase. Im Rahmen der Lebenszyklusbetrachtung gibt es bei jedem Gebäude einen Punkt, an dem eine Erhöhung des Wärmedämmstandards in Bezug auf den ELD nicht mehr zielführend ist, da die Reduktion an Emissionen und Endenergie der Nutzungsphase geringer sind als die Aufwendung an grauen Emissionen für die BK. Dieses Optimum zwischen Wärmedämmstoffdicke, Energiebedarf und dem ELD hängt maßgeblich vom Energieträger des Energiesystems ab. Der Grund, weshalb bei Variante v03a, v03b und v04b die Dämmstoffdicken so gering sind, liegt daran, dass die Energieträger geringe GWP pro kWh Endenergie aufweisen. Durch zusätzliche Wärmedämmung wird der Endenergiebedarf reduziert, multipliziert mit den Emissionswerten aus der ÖKOBAUDAT ergeben sich aber grundsätzlich geringe GWP. Beispielsweise weisen die Datensätze *Fernwärme aus Biomasse* ein GWP von 0,01153 kg CO₂-Äq. und *Strom aus Wasserkraft* ein GWP von 0,00595 kg CO₂-Äq. auf. Die Emissionen für die Nutzungsphase sind daher so gering, dass der optimale Punkt zwischen Dämmstoffdicken und Emissionen der Nutzungsphase bereits bei geringen Dämmstoffdicken (etwa 2 cm) erreicht ist. Hinsichtlich der Wärmedämmstoffdicke ist zu berücksichtigen, dass weitere Parameter wie beispielsweise die Oberflächentemperatur und ein möglicher Kondensatausfall die Dicke der Wärmedämmung beeinflussen kann. Der Vergleich zwischen Endenergiebedarf und ELD aus den Optimierungen ist in Abbildung 7.27 auf Seite 137 für die vier optimierten Varianten dargestellt. Anhand der Varianten v03a (Abbildung 7.27 Buchstabe a) und v03b (Abbildung 7.27 Buchstabe b) zeigt sich der Effekt der Erhöhung des Energiestandards und den Effekt auf den ELD deutlich. Bei einem geringen Wärmedämmstandard weisen die beiden Varianten einen Endenergiebedarf von etwa 45.000 bis 46.000 kWh/m²a auf. Wird der Wärmedämmstandard erhöht, reduziert sich der Endenergiebedarf und der ELD bis zum optimalen Punkt. Dieser liegt bei v03a bei einem Endenergiebedarf von etwa 30.000 kWh/m²a und bei v03b bei einem Endenergiebedarf von 35.000 kWh/m²a. Wird der Wärmedämmstandard weiter erhöht und somit der Endenergiebedarf reduziert, so steigt der ELD wieder an. Bei den Varianten zur Luft-Wasser-Wärmepumpe zeigt sich dieser Effekt nicht ganz so deutlich. Bei v04b ist zu erkennen, dass das Optimum im ELD beim höchsten Endenergiebedarf liegt. Dies zeigt sich ebenfalls anhand der optimierten Parameter, da die Dicken der Wärmedämmung alle auf das definierte Minimum von 2 cm reduziert wurden. Anhand dieser Darstellung zeigt sich, dass Gebäude multikriteriell bewertet werden müssen. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierbei nicht weiter eingegangen, da alle Varianten die baurechtlichen Mindestanforderungen an den Primärenergiebedarf einhalten und die Optimierung hinsichtlich der lebenszyklusbasierten Umweltwirkungen daher als Priorität definiert wird.

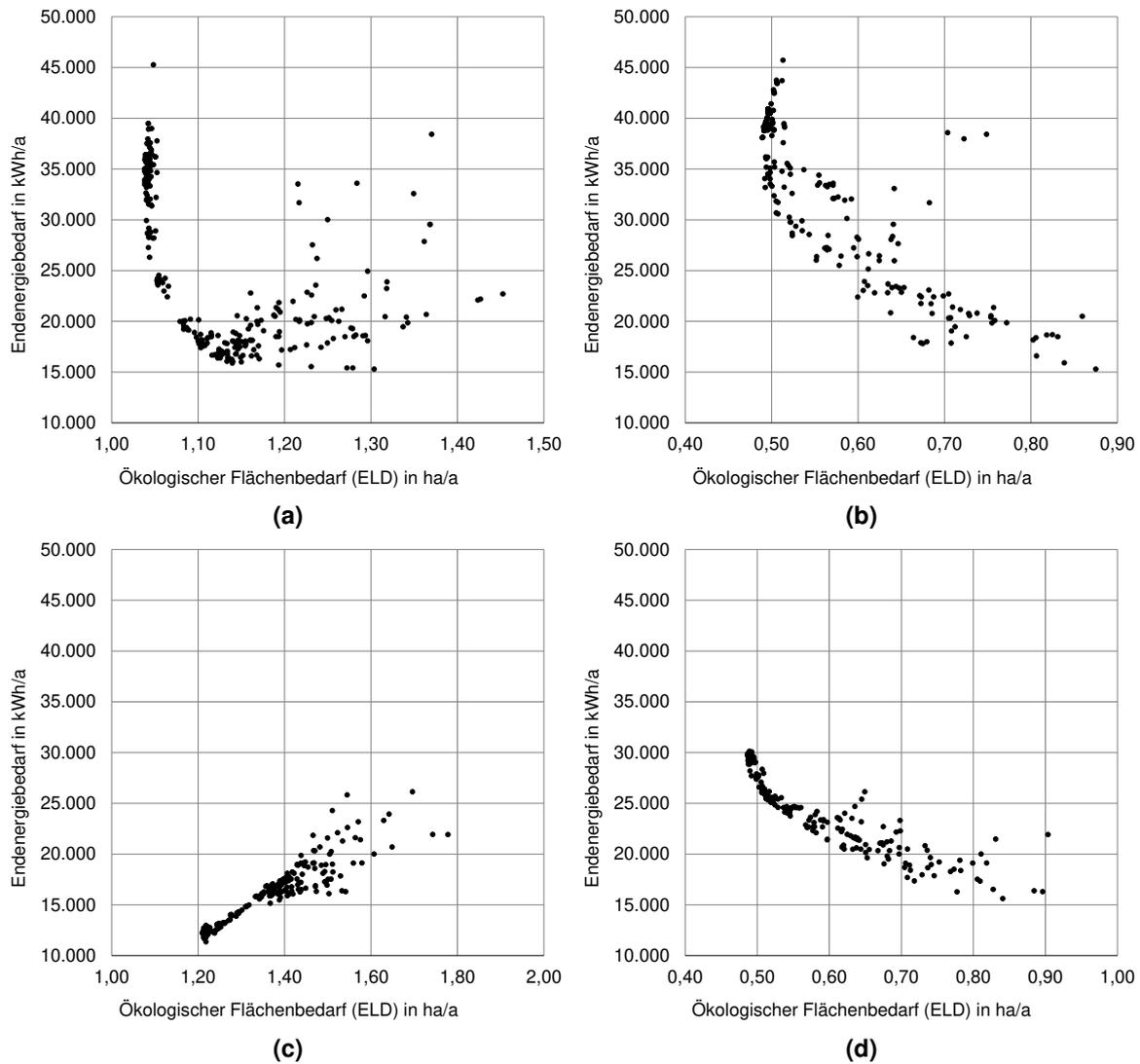


Abbildung 7.27 Darstellung des Endenergiebedarfs und des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) für die durchgeführten Optimierungen folgender Varianten: v03a - Fernwärme (a), v03b - Fernwärme mit Ökostrom (b), v04a - Luft-Wasser Wärmepumpe (c) und v04b - Luft-Wasser Wärmepumpe mit Ökostrom (d)

7.6 Erweiterung des Betrachtungshorizonts

In diesem Kapitel wird der Betrachtungshorizont ausgehend von der Gebäudeebene um folgende Aspekte erweitert:

- Grundstücksebene und Grüne Infrastruktur
- Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe
- Plusenergie und Klimaneutralität
- Bezug auf den bundesweiten Gebäudesektor

7.6.1 Grundstücksebene und Grüne Infrastruktur

Die Erweiterung des Betrachtungshorizonts führt dazu, dass die gesamte LCA des Bauprojekts genauer und transparenter wird, da auch Baumaßnahmen außerhalb des Gebäudes mitbilanziert werden. Wird die LCA nur für das Gebäude oder für einzelne Bestandteile des Gebäudes durchgeführt, so führt das zu einem Informationsverlust. Das Exkludieren von Komponenten aus der LCA kann Entscheidungen im Planungsprozess beeinflussen. Das Resultat wäre, dass nicht alle negativen Umweltwirkungen kompensiert werden würden. Dasselbe gilt für die grüne Infrastruktur. Wird diese nicht betrachtet, so kann das im Rahmen des Bauprojekts dazu führen, dass potenzielle positive Wirkungen hinsichtlich Biodiversität oder ökologischen Kompensationspotenzialen nicht berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Erweiterung werden folgende Schritte durchgeführt:

- Berechnung der Lebenszyklusanalyse für die bestehende Freifläche
- Darstellung des Einflusses des Parkplatzes auf den Ökologischer Flächenbedarf (ELD)
- Berechnung der Umweltentlastungspotenziale der Grünen Infrastruktur
- Darstellung des Einflusses der Grünen Infrastruktur auf den ELD

Die Freifläche um das Gebäude besteht maßgeblich aus asphaltierten Verkehrswegen und Parkplätzen für die Mitarbeitenden. Für den Parkplatz wird der Asphaltaufbau näherungsweise nach der Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) [223] angenommen. Hierbei erfolgt die Auslegung der Belastungsklasse (Bk) der Verkehrsfläche anhand der Belastung von Überfahrten durch Fahrzeuge. Angegeben wird die Bk in Millionen äquivalenten 10-t-Achsübergängen. Für Parkplätze, die nicht ständig von starkem Verkehr genutzt werden, ist eine Bk von 1,8 angegeben. Basierend auf der Bk 1,8 ergibt sich folgender Aufbau für den Parkplatz:

- 40 mm Asphalt bzw. Pflastersteine
- 160 mm Asphalttragschicht
- 450 mm Granulat



Abbildung 7.28 Schematische Darstellung der bestehenden Freiflächen auf dem Gebäudegrundstück (Quelle: [224]; leicht modifiziert)

Anhand der Analysen zum Grundstück (siehe Abbildung 7.28) ergibt sich eine Fläche für den gesamten Parkplatz von 2.285 m². Dieser teilt sich auf in 1.950 m² Verkehrsfläche mit Asphalt und in 335 m² Parkplatzfläche mit Pflastersteinen.

Basierend auf dem Aufbau und den Flächen ergeben sich folgende Umweltwirkungen (siehe Tabelle 7.18). Für die Freifläche auf dem Grundstück ergibt sich ein Treibhauspotenzial (GWP) von 76.817 kg CO₂-Äq., ein Versauerungspotenzial (AP) von 172 kg SO₂-Äq. und Eutrophierungspotenzial (EP) von 25 kg Phosphat-Äq. Die verwendeten Datensätze sind dem Anhang B siehe Tabelle B.22 zu entnehmen.

Tabelle 7.18 Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse des Parkplatzes

	GWP in kg CO ₂ -Äq.	AP in kg SO ₂ -Äq.	EP in kg Phosphat-Äq.
Herstellung	66.546	106	18
Austausch	0	0	0
Entsorgung	10.271	65	7
Recyclingpotenzial	-18.983	-59	-6
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	76.817	172	25

Die Ergebnisse zur Erweiterung des Betrachtungshorizonts hinsichtlich des ELD sind in Abbildung 7.29 dargestellt. Für den bilanzierten Freiraum und Parkplatz ergibt sich in Bezug auf den ELD ein zusätzlicher Bedarf an ökologischer Fläche von 0,16 ha/a. In Bezug auf die Ausgangsvariante v01 bedeutet dies, dass der gesamte ELD 3,29 ha/a beträgt und um etwa +5 % erhöht wird. Hinsichtlich v02 erhöht sich

der gesamte ELD auf 2,59 ha/a, dies entspricht einer Erhöhung um etwa etwa +6 %. In Bezug auf die optimierten Gebäudevarianten zeigt sich, dass die Freifläche einen größeren relativen Anteil am gesamten ELD ausmacht. Die relative Erhöhung des ELD liegt bei: +15 % für v03a, +32 % für v03b, +13 % für v04a und +33 % für v04b.

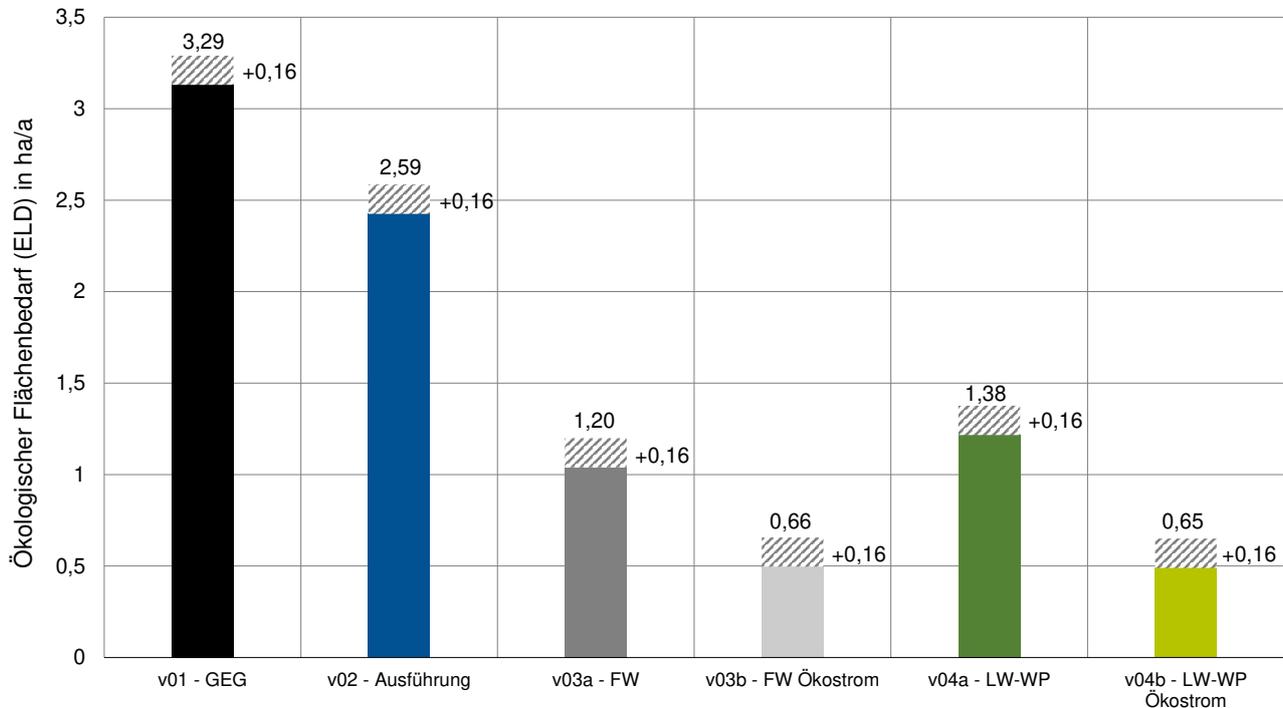


Abbildung 7.29 Darstellung des Einflusses der bestehenden Freiflächen auf den ELD aller untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

Zur Ermittlung des potenziellen Einflusses von Grüner Infrastruktur auf den ELD wird angenommen, dass die komplette Freifläche und das Gebäudedach begrünt werden. Schematisch ist diese Aufteilung in Abbildung 7.30 dargestellt. In dieser Annahme werden mögliche asphaltierte Verkehrswege zur Begehung des Gebäudes vernachlässigt. Diese Annahme berücksichtigt daher die maximal zur Verfügung stehende Fläche. Die Grüne Infrastruktur besteht dabei aus der Dachbegrünung und der Grünfläche um das Gebäude. Für das Gründach ergibt sich eine Fläche von etwa 400 m² und für die Grünfläche um das Gebäude von 2.285 m². Zur Ermittlung des Einflusses auf den ELD besteht der erste Schritt darin, die Umweltentlastungspotenziale der definierten Grünflächen zu ermitteln und anschließend mit dem ELD des Gebäudes zu kombinieren.



Abbildung 7.30 Schematische Darstellung der potenziellen Grünflächen auf dem Gebäudegrundstück (Quelle: [224]; leicht modifiziert)

Für die Grünfläche um das Gebäude werden die Kennwerte für Grünland gemäß Kapitel 6.3.2 angenommen. Die Kennwerte für das Gründach basieren auf den Ergebnissen einer Literaturrecherche, zusammengefasst in Tabelle 7.19 auf Seite 142. Die Kennwerte für AP und EP basieren auf der Publikation von Yang et al. [225]. Yang gibt für AP ein Bindungsvermögen von $0,00065 \text{ kg SO}_2/\text{m}^2$ und für EP von $0,0003 \text{ kg Phosphat-}\ddot{\text{A}}\text{q. an}$. Hinsichtlich des CO_2 -Bindungsvermögen zeigt sich anhand der identifizierten Literatur eine hohe Spannweite. Dies liegt daran, dass in den einzelnen Quellen unterschiedliche Pflanzen, Versuchsaufbauten und Versuchsdauern untersucht wurden. Des Weiteren unterscheiden sich die Quellen hinsichtlich des Ortes und des Klimas. In Bezug auf die Versuchsdauern zeigt sich, dass die identifizierten Quellen nur recht kurze Versuchsdauern von etwa 1 bis 3 Jahren aufweisen. Einige der Autor:innen geben an, dass es sich bei den Kennwerten um keine langfristigen Bindungspotenziale handelt. Die Untersuchung von Heusinger und Weber bezieht sich auf den Standort Deutschland und weist ein langfristiges Bindungspotenzial aus, weswegen der Wert von $0,313 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ in dieser Arbeit verwendet wird.

Tabelle 7.19 CO₂-Bindungsvermögen von Dachbegrünungen

Quelle	Land	Art der Begrünung	CO ₂ für Herstellung	CO ₂ -Bindung
Cascone et al. 2018 [226]	Italien	extensiv	-	1,35 ²
Getter 2009 [227]	-	extensiv	25,6 ¹	1,19 ± 0,59 ¹
George 2012 [228]	USA	extensiv	-	1,17 ² 0,23 ²
Herfort et al. 2012 [229]	Deutschland	extensiv	-	0,95 ± 0,21 ¹
		intensiv	-	2,4 ± 0,41 ¹
Heusinger & Weber 2017 [230]	Deutschland	extensiv	-	0,313 ²
Kuronuma & Watanabe 2017 [231]	Japan	extensiv	-	1,58 ± 0,63 ²
Kuronuma et al. 2018 [232]	Japan	extensiv	25,5 ¹	1,23 ²
				2,41 ± 0,32 ²

¹ in kg CO₂/m²² in kg CO₂/m²a

Die Ergebnisse zur Berechnung des ELD sind in Abbildung 7.31 auf Seite 143 dargestellt. Für die Variante v01 ergibt sich ein ELD von 2,91 ha/a. Die berücksichtigte Grüne Infrastruktur reduziert den ELD dabei um -7 %. Da in allen betrachteten Varianten dieselbe Grüne Infrastruktur angesetzt wurde, erhöht sich das relative Umweltentlastungspotenzial. Dieses steigt bei v02 auf etwa -9 %. Deutlich höher liegt die Reduktion bei den betrachteten optimierten Gebäudevarianten. Die Berücksichtigung der Grünen Infrastruktur führt hierbei zu folgenden Potenzialen: -26 % (v03a), -44 % (v03b), -18 % (v04a) und -45 % (v04b). In Bezug auf die optimierten Varianten kann durch die Grüne Infrastruktur der ELD signifikant reduziert werden. Bei diesen Potenzialen muss jedoch beachtet werden, dass Herstellung, Wartung und Instandhaltung nicht berücksichtigt sind. Die angegebenen Werte stellen daher maximal zu erreichende Differenzen dar. Des Weiteren sind für die Ermittlung der realen Umweltentlastungspotenziale die Maßnahmen zur Grünen Infrastruktur spezifischer (beispielsweise in Bezug auf die eingesetzten Pflanzenarten) abzustimmen und zu planen. Daher stellen die hier dargestellten Werte lediglich Tendenzen dar.

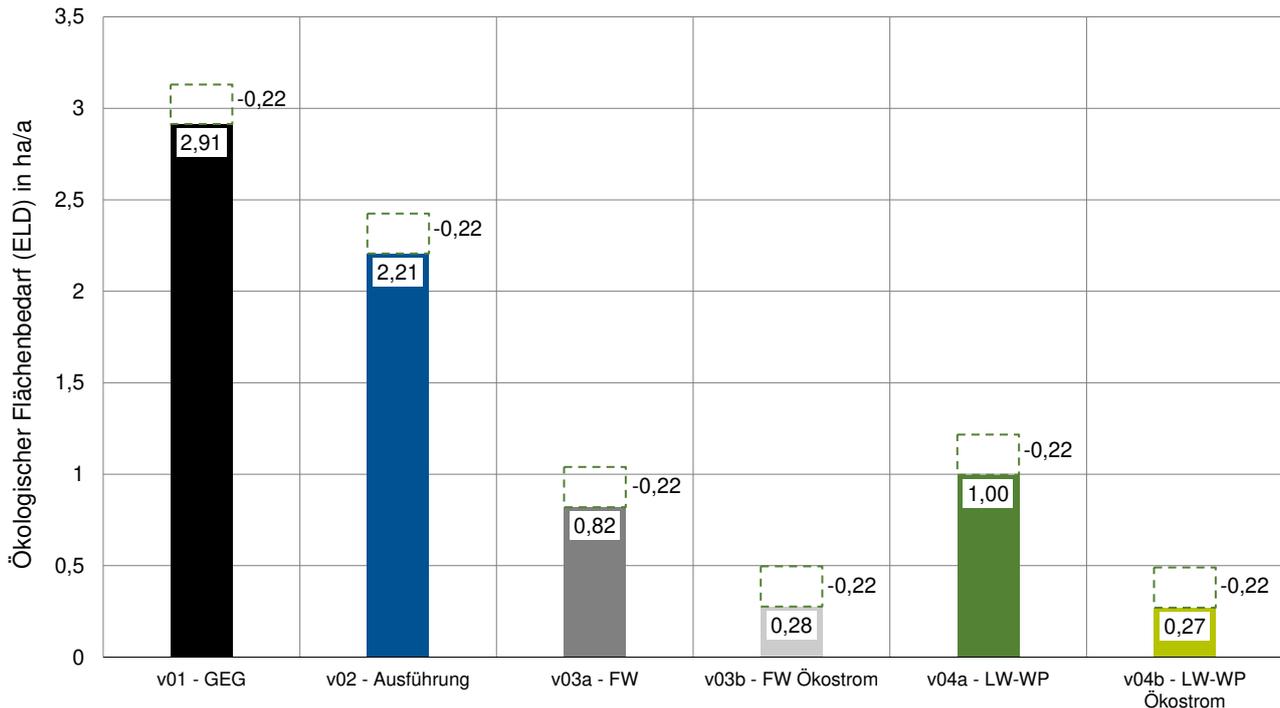


Abbildung 7.31 Darstellung des Einflusses Grüner Infrastruktur auf den ELD aller untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)

7.6.2 Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe

In Ergänzung zum ELD besteht ein Flächenbedarf für die Anbaufläche für die verwendeten nachwachsenden Rohstoffe. Bei den untersuchten Varianten (v03a/b und v04a/b) besteht die Tragkonstruktion aus einer Holzmassivbauweise. Des Weiteren besteht die Wärmedämmung aus einer Holzfaserdämmung und der Fensterrahmen aus Holz. Gemäß den Bauteilflächen und den Bauteilaufbauten (siehe Anhang B) ergibt sich für die untersuchten Varianten eine gesamte verbaute Holzmenge von: 255 m³ (v03a), 256 m³ (v03b), 276 m³ (v04a) und 252 m³ (v04b). Um die erforderliche Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe zu ermitteln, wird im Folgenden die notwendige Waldfläche ermittelt, die notwendig ist, um über den betrachteten Zeitraum von 50 Jahren die verbaute Holzmenge nachwachsen zu lassen.

Gemäß der Kohlenstoffinventur 2017 des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) ergibt sich ein bundesweiter Zuwachs an Holz (für alle Baumarten) von etwa 10,9 m³/(ha a). Aufgrund von verbleibendem Totholz im Wald, Ernteverlusten und Rinde sowie dem Vorratsaufbau im Wald sind vom gesamten Zuwachs etwa 62 % des Zuwachses als Bauholz nutzbar. Somit ergibt sich ein nutzbarer Zuwachs von etwa 6,8 m³/(ha a). [186]

Unter Berücksichtigung der verbauten Holzmengen und dem mittleren jährlichen Zuwachs ergeben sich für die einzelnen Gebäudevarianten entsprechende Waldflächen (siehe Tabelle 7.20). Es zeigt sich, dass für v03a/b und v04a/b Waldflächen von etwa 0,75 bis 0,81 ha/a benötigt werden, damit über den gesamten Lebenszyklus die verbaute Menge an Holz nachwachsen kann. In Bezug auf den ELD bedeutet dies, dass sich die Gesamtfläche auf folgende Flächen erhöht: v03a 1,79 ha/a, v03b 1,25 ha/a, v04a 2,03 ha/a und v04b 1,24 ha/a. Bezogen auf die Gesamtfläche stellt die benötigte Waldfläche einen signifikanten Flächenanteil dar. Dieser ist bei v03a etwa 42 %, bei v03b etwa 60 %, bei v04a etwa 40 % und bei v04b etwa 60 %. Aufgrund der hohen relativen Anteile der Anbaufläche am gesamten ökologischen Flächenbedarf

ist es bei der Planung und Umsetzung von nachhaltigen Gebäuden notwendig, diesen Flächenbedarf zu berücksichtigen.

Tabelle 7.20 Darstellung der Fläche für die nachwachsenden Rohstoffe in Bezug zum ELD aller untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren)

Variante	ELD in ha/a	Waldfläche in ha/a	Gesamtfläche in ha/a
v01 - GEG	3,13	-	3,13
v02 - Ausführung	2,43	-	2,43
v03a - FW	1,04	0,75	1,79
v03b - FW Ökostrom	0,50	0,75	1,25
v04a - LW-WP	1,22	0,81	2,03
v04b - LW-WP Ökostrom	0,49	0,75	1,24

Des Weiteren ist in Abbildung 7.32 der ELD und die Anbaufläche für die nachwachsenden Rohstoffe im Vergleich zum Gebäude und der umliegenden Infrastruktur dargestellt. Die Flächen dienen zur Einordnung der einzelnen Flächenbedarfe und der Gebäudegrundfläche.



Abbildung 7.32 Visuelle Darstellung des ökologischen Flächenbedarfs ELD (in grün) und der Anbaufläche für die nachwachsenden Rohstoffe (in schwarz) für die verschiedenen untersuchten Gebäudevarianten (Quelle: [222]; leicht modifiziert)

7.6.3 Plusenergie und Klimaneutralität

Hinsichtlich der definierten Klimaschutzziele für den Betrieb von Gebäuden und dem sich daraus ergebenden Klimaschutzfahrplan gemäß dem *Carbon Risk Real Estate Monitor* (CRREM) [233] zeigen die Ergebnisse, dass die Gebäudevarianten v01 und v02 die definierten Klimaziele ab den Jahren 2042 und 2045 nicht mehr einhalten (siehe Abbildung 7.33). Die optimierten Varianten v03a und v04a halten die Klimaziele bis 2049 ein. Die Varianten, in denen Ökostrom verwendet wird (v03b und v04b), halten die definierten Ziele bereits heute für das Jahr 2050 ein. Es zeigt sich, dass die Variante v01 gemäß dem baurechtlich geltenden Gebäudeenergiegesetz (GEG) die Klimaschutzziele nicht einhält. Dies bedeutet, dass das GEG überarbeitet und geeignete Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele implementiert werden müssen.

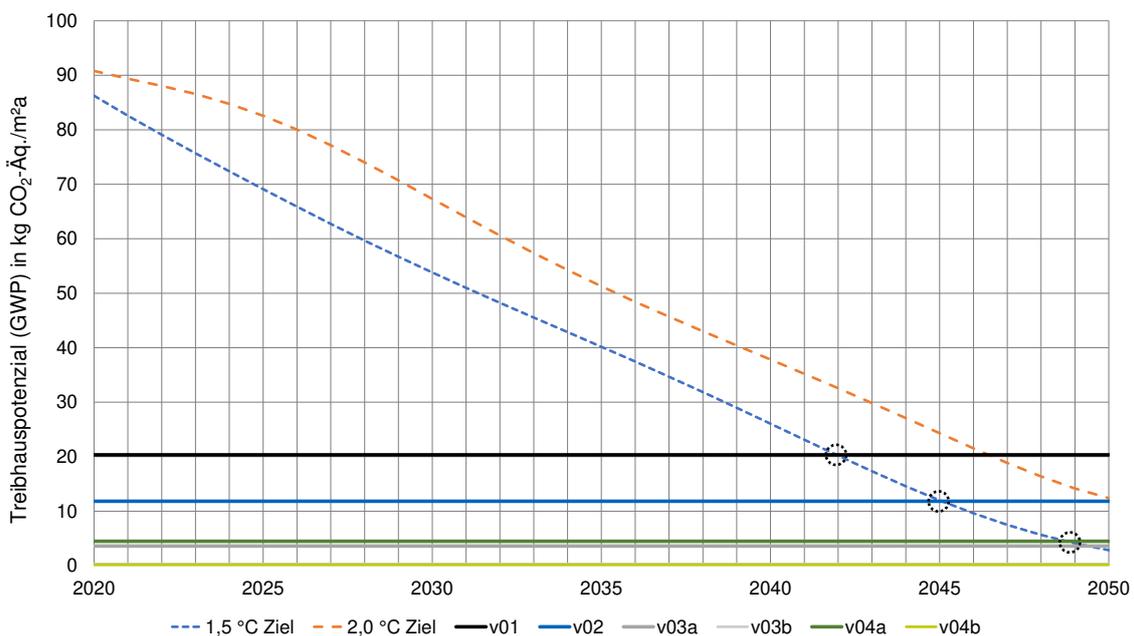


Abbildung 7.33 Vergleich der untersuchten Gebäudevarianten hinsichtlich der definierten Dekarbonisierungsziele für die globale Erwärmung von maximal 1,5 °C (gestrichelte Linie, blau) und 2,0 °C (gestrichelte Linie, orange) anhand der CRREM-Kurven [233] (eigene Darstellung)

Zur Realisierung eines klimaneutralen Plusenergiegebäudes stellt der bilanzielle Ausgleich des Treibhauspotenzials (GWP) und des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PENRT) eine gängige Möglichkeit dar. Dies kann zum Beispiel durch die Erzeugung und Einspeisung von regenerativ erzeugter Energie in das deutsche Stromnetz realisiert werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass der eingespeiste erneuerbare Strom nichterneuerbare Anteile verdrängt. Die dadurch vermiedenen Energien an PENRT und Emissionen an GWP werden dann in der Lebenszyklusanalyse des Gebäudes positiv angerechnet. Der bilanzielle Ausgleich basiert dabei auf den Kennwerten für den aktuellen deutschen Strom-Mix, wobei pro Kilowattstunde Strom 6,596 MJ an Primärenergie und 0,5894 kg CO₂-Äq. anfallen [10]. Im Folgenden wird angenommen, dass der erneuerbare Strom durch eine PV-Anlage erzeugt wird. Die gesamten notwendigen Flächen zur Realisierung eines klimaneutralen Plusenergiegebäudes im Betrieb sind in Tabelle 7.21 zusammengefasst. Dabei ergibt sich für die Variante v01 eine PV-Fläche von 416 m². Durch die Umsetzung einer effizienteren Energieerzeugung und der Verwendung von Ökostrom in den Varianten v02 bis v04b kann die benötigte PV-Fläche deutlich auf bis zu 3 m² reduziert werden.

Tabelle 7.21 Treibhauspotenzial (GWP) und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) der untersuchten Varianten und die notwendige PV-Fläche zur Realisierung eines klimaneutralen Plusenergiegebäudes im Betrieb

Variante	GWP in kg CO ₂ -Äq.	PENRT in MJ	PV-Fläche in m ²
v01 - GEG	1.103.615	92.164	416
v02 - Ausführung	648.897	39.821	183
v03a - FW	359.877	22.038	101
v03b - FW Ökostrom	16.852	732	5
v04a - LW-WP	244.215	14.987	69
v04b - LW-WP Ökostrom	8.840	197	3

Wird der Fokus bei der Klimaneutralität allerdings nur auf den Betrieb gesetzt, so werden die grauen Energien und Emissionen für die Baukonstruktion und die Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung vernachlässigt. Im Folgenden wird daher die benötigte PV-Fläche unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus (inklusive aller Emissionen bezogen auf die Baukonstruktion und der Technischen Gebäudeausrüstung) ermittelt. Die benötigten PV-Flächen sind in Tabelle 7.22 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die benötigten PV-Flächen deutlich ansteigen. Im Vergleich zur vorherigen Berechnung ergeben sich folgende PV-Flächen: v01 862 m² (+207 %), v02 506 m² (+276 %), v03a 342 m² (+339 %), v03b 184 m² (+3.680 %), v04a 320 m² (+464 %) und v04b 130 m² (+4.333 %). Die Ergebnisse zeigen, dass Unterschiede in den benötigten PV-Flächen von etwa +207 % bis +4.333 % bestehen. Diese signifikante Erhöhung lässt sich damit begründen, dass die Herstellung von Komponenten der Baukonstruktion und der Technischen Gebäudeausrüstung noch nicht vollständig mit erneuerbaren Energien realisiert wird und somit graue Energie und Emissionen auftreten. Um die grauen Energien und Emissionen weiter zu reduzieren, ist der Ausbau an erneuerbaren Energien zwingend notwendig, wodurch sich der zukünftige CO₂-Ausstoß von Herstellungsprozessen reduzieren wird.

Tabelle 7.22 Treibhauspotenzial (GWP) und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) der untersuchten Varianten und die notwendige PV-Fläche zur Realisierung eines klimaneutralen Plusenergiegebäudes über den gesamten Lebenszyklus

Variante	GWP in kg CO ₂ -Äq.	PENRT in MJ	PV-Fläche in m ²
v01 - GEG	1.562.115	34.334.319	862
v02 - Ausführung	1.193.207	20.128.126	506
v03a - FW	590.195	13.627.055	342
v03b - FW Ökostrom	232.249	7.310.230	184
v04a - LW-WP	584.923	12.710.405	320
v04b - LW-WP Ökostrom	235.286	5.171.059	130

7.6.4 Bezug auf den bundesweiten Gebäudesektor

Um zu verdeutlichen, welche Fläche an Ökosystemen der bundesweite Gebäudesektor aktuell beansprucht, wird hierfür der ökologische Flächenbedarf (ELD) berechnet. Dabei werden Daten zur Endenergiebilanz des Gebäudesektors basierend auf dem Jahr 2020 verwendet, welche von der AG Energiebilanzen e.V. bereitgestellt werden [234]. Die Daten beziehen sich jedoch nur auf den Endenergiebedarf im Betrieb, die Komponenten der Baukonstruktion und der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) sind nicht berücksichtigt. In Tabelle 7.23 auf Seite 147 sind die verschiedenen Energieträger sowie die Umweltwirkungen für das GWP, das AP und das EP aufgeführt.

Tabelle 7.23 Umweltwirkungen des bundesweiten Gebäudesektors basierend auf der Endenergiebilanz für das Jahr 2020 nach [234]

Energieträger	Anteil in %	GWP in t CO ₂ -Äq.	AP in t SO ₂ -Äq.	EP in t Phosphat-Äq.
Steinkohle	0,1 %	195.197	245	33
Braunkohle	0,3 %	955.407	764	103
Mineralöl	20,5 %	65.842.367	52.486	8.722
Erdgas	34,4 %	83.211.954	42.960	7.264
Erneuerbare Energien	12,6 %	1.354.343	413	221
Strom	26,5 %	159.646.812	197.016	31.574
Fernwärme	5,7 %	14.353.468	14.748	2.719

Basierend auf den Umweltwirkungen sind die ökologischen Flächenbedarfe für den Gebäudesektor in Abbildung 7.34 dargestellt. Es ergeben sich folgende ELD: für GWP 33.193.743 ha/a, für AP 8.332.686 ha/a und für EP 1.316.388 ha/a. Es zeigt sich dabei, dass das Ökosystem Wald den größten relativen Anteil aufweist. Die absoluten Werte sind im Anhang A in Tabelle A.11 auf Seite 195 aufgelistet.

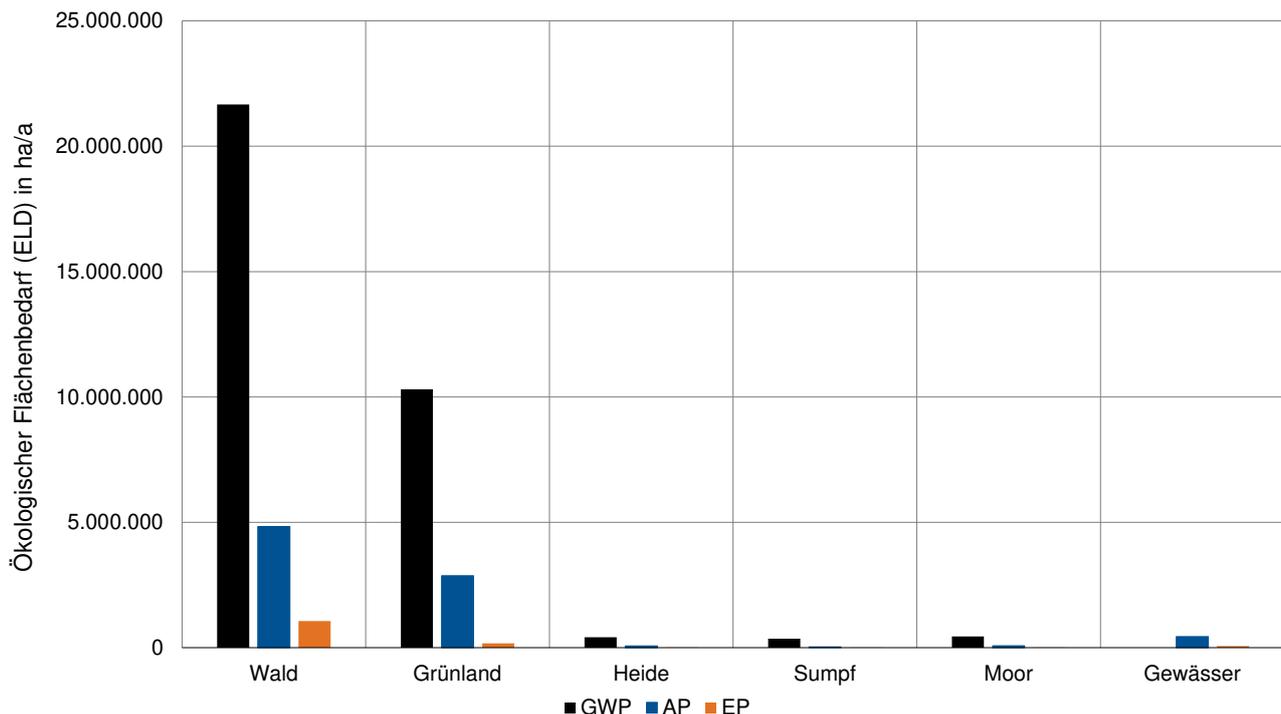


Abbildung 7.34 Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha/a des bundesweiten Gebäudesektors basierend auf dem Endenergiebedarf des Betriebs von Gebäuden (eigene Darstellung)

Um den ELD des gesamten Gebäudesektors einzuordnen, sind die einzelnen ELDs im Verhältnis zur gesamten Fläche der bundesweiten Ökosysteme in Abbildung 7.35 dargestellt. Gemäß Tabelle 6.1 auf Seite 64 ergibt sich eine Gesamtfläche für die bundesweiten Ökosysteme von 20.698.564 ha. Basierend auf dem ELD für das GWP ergibt sich ein Anteil der beanspruchten Fläche von 160 %. Das heißt, dass die gesamte Fläche an bundesweiten Ökosystemen nicht ausreicht, um die jährlichen Emissionen des Gebäudesektors zu binden. Bezogen auf die bundesweiten Ökosysteme ist die 1,6-fache Fläche notwendig. Unter Berücksichtigung des ELD für AP ergibt sich ein Anteil der beanspruchten Fläche von 40 %. Das bedeutet, dass grundsätzlich die bundesweite Fläche zur Bindung der jährlichen Emissionen hinsichtlich des Versauerungspotenzials ausreicht, allerdings trägt der Bausektor dennoch zu einem maßgeblichen Anteil zur Belastung dieser Ökosysteme bei. Hinsichtlich EP ergibt sich ein beanspruchter Flächenanteil von 6 %.

In Bezug auf diese Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass Deutschland Energieimporte bezieht und daher nicht alle Emissionen innerhalb der Bundesgrenzen anfallen. Des Weiteren ist zu beachten, dass sektorübergreifend zusätzlich zum Gebäudesektor auch die Landwirtschaft, der Industriesektor und der Verkehrssektor zu einer hohen Umweltbelastung beitragen. Anhand dieser Darstellung lässt sich der große Einfluss des Gebäudesektors auf Ökosysteme darstellen, eine Dringlichkeit zur Reduktion von Luftschadstoffen im Bausektor ableiten und die Umsetzung von Prinzipien zum positiven Bauen begründen. Wie in dieser Arbeit dargestellt, können mithilfe einer erneuerbaren Energieversorgung signifikante Umweltentlastungspotenziale erreicht werden. Des Weiteren sind Maßnahmen zur ökologischen Kompensation und Wiederherstellung von geschädigten Ökosystemen notwendig, um eine langfristige Stabilität dieser Systeme zu gewährleisten.

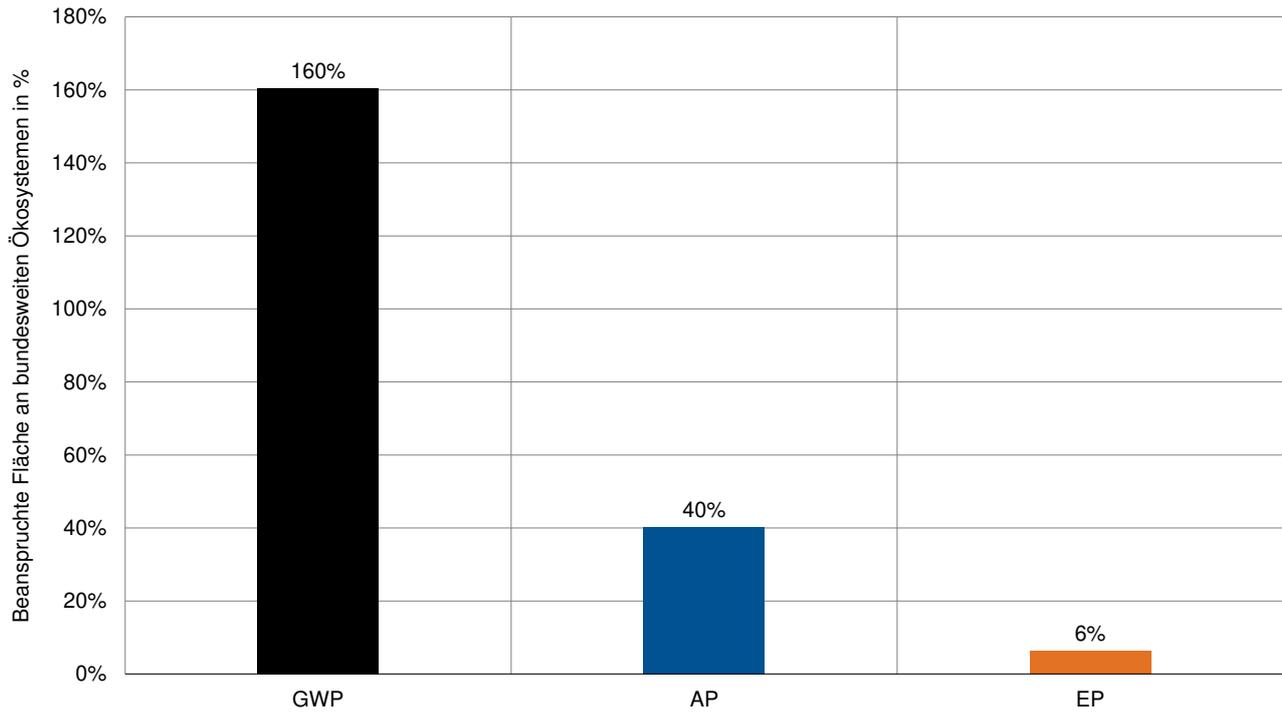


Abbildung 7.35 Beanspruchte Fläche in % an bundesweiten Ökosystemen durch den Gebäudesektor basierend auf dem Endenergiebedarf des Betriebs von Gebäuden (eigene Darstellung)

7.7 Bedeutung der Ergebnisse für die Umsetzung nachhaltiger Gebäude

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, welche Flächen an natürlichen Ökosystemen notwendig sind, um die lebenszyklusbasierten Emissionen zu binden. Diese Art der Darstellung der Emissionen zeigt, dass Gebäude nicht nur einen Flächenbedarf hinsichtlich derer Grundfläche, sondern auch einen ökologischen Flächenbedarf aufweisen. Dies erweitert den Betrachtungshorizont der klassischen Lebenszyklusanalyse dahin gehend, dass den ermittelten Wirkungsindikatoren eine greifbare und verständliche Größe beigegeben wird. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse den großen Einfluss von Gebäuden auf Ökosysteme. Bezogen auf die Umsetzung nachhaltiger Gebäude ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Mit Hilfe der entwickelten Methode zur Quantifizierung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) lassen sich Umweltwirkungen der Wirkungsindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) unter Berücksichtigung verschiedener Ökosystemtypen in einem Kennwert darstellen. Für den Bausektor eröffnet der ELD einen neuen Betrachtungshorizont, bei dem die Ergebnisse von Lebenszyklusanalysen (LCA) in einer verständlichen Art und Weise und in Bezug auf Ökosysteme dargestellt werden können. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen beispielsweise, dass der ELD das bis zu 26-fache der Nettogrundfläche des untersuchten Gebäudes betragen kann. Durch die Implementierung von Prinzipien zum positiven Bauen und durch die Anwendung von Optimierungsverfahren konnte dieser Wert auf das 4,2-fache reduziert werden. Für die Planung und Umsetzung von nachhaltigen Gebäuden besteht ein großes Umweltentlastungspotenzial in der Berücksichtigung von erneuerbaren Energien und nachwachsenden Rohstoffen. Um ökologisch positive Gebäude zu realisieren, müssen Maßnahmen zur ökologischen Kompensation umgesetzt werden. Ein positiver ökologischer Flächenbedarf wird dabei durch eine Überkompensation erreicht, das heißt mehr Fläche muss kompensiert werden als das Gebäude beansprucht.
- Die Berechnungen des ELD zeigen, dass grundsätzlich die größten Flächenbedarfe für die terrestrischen Ökosysteme durch den Wirkungsindikator Treibhauspotenzial (GWP) hervorgerufen werden. Des Weiteren zeigt sich, dass die Wirkungsindikatoren Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) deutlich an Bedeutung gewinnen, wenn die Gebäude parametrisch optimiert werden. Dies kann dazu führen, dass das AP den maßgeblichen Wirkungsindikator darstellt. Dadurch, dass der ELD diese Effekte berücksichtigt, stellt dieser für die Bewertung von Ergebnissen von Lebenszyklusanalysen eine geeignete Methode dar.
- Anhand der Sensitivitätsanalyse für die untersuchte Variante v01 zeigt sich, dass die Wahl des Energiesystems und der verwendete Strom-Mix die größten Einflüsse auf die analysierten Wirkungsindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) sowie den ökologischen Flächenbedarf (ELD) haben. Mit der Verwendung von erneuerbaren Energieträgern können im Vergleich zu fossilen Energieträgern deutliche Umweltentlastungspotenziale erreicht werden. Für die Planung und Umsetzung von nachhaltigen Gebäuden bedeutet dies, dass die Planung und Integration von erneuerbaren Energiesystemen im Vordergrund stehen muss. Aufgrund des hohen Einflusses auf die Umweltwirkungen muss die Verwendung erneuerbarer Energieträger baurechtlich gefordert werden. Zudem müssen finanzielle Anreize zur Umsetzung geschaffen werden.
- In Bezug auf die Baukonstruktion zeigt sich, dass diese für etwa ein Drittel der Gebäudeemissionen verantwortlich ist. Dieser Anteil erhöht sich auf etwa zwei Drittel, wenn das Gebäude über eine erneuerbare Energieversorgung verfügt. Für die Umsetzung nachhaltiger Gebäude und zur Ermittlung

der gesamten Umweltwirkungen von Gebäuden ist die Lebenszyklusanalyse zwingend erforderlich. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass mit der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen in Bezug auf das Treibhauspotenzial (GWP) große Umweltentlastungspotenziale erreicht werden können. Über den Lebenszyklus können Gebäude als CO₂-Speicher dienen und entscheidend zum Klimaschutz beitragen. Die Entsorgungsphase des Gebäudes gewinnt hierbei an Bedeutung, da bei einer thermischen Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen das gebundene CO₂ wieder emittiert wird. Eine kreislaufgerechte Baukonstruktion und die Wiederverwendung von Rohstoffen muss hierbei bereits in den frühen Planungsphasen berücksichtigt werden.

- Hinsichtlich der Wirkungsindikatoren Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) zeigt sich, dass durch die Verwendung von nachwachsenden Ressourcen keine generellen Reduktionspotenziale im Vergleich zu mineralischen Bauteilen und Materialien erzielt werden können. Für den Planungsprozess bedeutet das, dass je nachdem, welcher Wirkungsindikator betrachtet wird, dies zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Daher ist eine Gewichtung der einzelnen Wirkungsindikatoren wichtig.
- Bei der parametrischen Optimierung zeigt sich die Bedeutung der definierten Zielfunktion und der untersuchten Gebäudevariante. Wie die Ergebnisse zum Vergleich zwischen dem Endenergiebedarf und dem ökologischen Flächenbedarf zeigen, ist es wichtig zu verstehen, dass die Ergebnisse der Optimierung je nach Definition der Zielfunktion und der untersuchten Gebäudevariante unterschiedlich sein können. Des Weiteren ist zu erkennen, dass beispielsweise in Variante v04b (Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Ökostrom) der geringste ökologische Flächenbedarf (ELD) bei gleichzeitig höchsten Energiebedarf erreicht wird. Für die Umsetzung von nachhaltigen Gebäuden muss daher im Vorfeld definiert werden, wofür die parametrische Optimierung eingesetzt werden soll. Vor der eigentlichen Optimierung ist es empfehlenswert eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um Parameter zu identifizieren, die keinen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße haben. Dadurch wird die Komplexität des Simulationsmodells und die Simulationszeiten reduziert.
- In Bezug auf die Anbaufläche von nachwachsenden Rohstoffen ergeben sich Waldflächen von etwa 0,75 bis 0,81 ha/a. Verglichen mit dem Ökologischer Flächenbedarf (ELD) zeigt sich, dass die Anbaufläche einen signifikanten Anteil am gesamten Ökologischen Flächenbedarf ausmachen kann. Für die Umsetzung nachhaltiger Gebäude ist es notwendig, diese Fläche zu berücksichtigen. Der Anbau und Abbau von Rohstoffen kann Einflüsse auf die Biodiversität, das Landschaftsbild und die Wasserwirtschaft haben [235].
- Hinsichtlich des Zieles der Klimaneutralität und der Plusenergie ist der Anteil von erneuerbarer Energie (beispielsweise mittels einer PV-Anlage) am deutschen Strom-Mix von zentraler Bedeutung. Abhängig von der betrachteten Systemgrenze sind PV-Flächen innerhalb des Grundstücks von 416 m² (v01 und nur Betrieb) bis zu 862 m² (v01 und gesamter Lebenszyklus) notwendig. Die benötigte PV-Fläche kann durch eine erneuerbare Energieerzeugung im Betrieb und der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen in der Baukonstruktion signifikant auf etwa 130 m² (v04b - LW-WP Ökostrom) beziehungsweise 184 m² (v03b - FW Ökostrom) reduziert werden. Um die grauen Energien und Emissionen in der Herstellung der Baukonstruktion und den Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung weiter zu reduzieren, ist der Ausbau an erneuerbaren Energien zwingend notwendig.

7.8 Kurzzusammenfassung

Die Anwendung der in dieser Dissertation entwickelten Methode zur Ermittlung und Optimierung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) führt zusammenfassend zu folgenden Erkenntnissen:

- Die entwickelte Methode zur Ermittlung des Ökologischer Flächenbedarf (ELD) lässt sich basierend auf Lebenszyklusanalysen (LCA) auf Gebäude und Grundstücksebene anwenden. Dadurch lässt sich der Einfluss von Gebäuden auf Ökosysteme unter Berücksichtigung von deren spezifischen Eigenschaften und Bindungskapazitäten darstellen. Die dargestellte Methode erweitert den Betrachtungshorizont der klassischen LCA und ermöglicht dabei eine greifbare und verständliche Art der Interpretation von Ergebnissen.
- Unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus Kapitel 2 zum Klimaschutz und den möglichen Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität zeigt sich anhand der Erkenntnisse zum ELD, dass ökologische Lösungen zur Kompensation von Umweltwirkungen notwendig sind. Die Einspeisung und Bilanzierung von erneuerbar erzeugtem Strom ins bundesweite Stromnetz wird in Bezug auf die Dekarbonisierung des Energiesystems als vernünftig erachtet. Jedoch kann festgestellt werden, dass diese Maßnahme keine ökologische Kompensation darstellt, bei der die negativen Umweltauswirkungen menschlicher Aktivitäten ausgeglichen werden. Eine mögliche Option zur Erreichung dieses Ziels besteht in der Aufforstung. Laut Bastin et al. stellt die weltweite Aufforstung eine effektive Strategie zur Minderung des Klimawandels durch die Verringerung von Treibhausgasemissionen dar [236].
- Basierend auf der Parameterstudie haben die Wahl des Energiesystems, der verwendete Strom-Mix und die Baukonstruktionsart den größten Einfluss auf den ELD.
- Für das Fallbeispiel ergeben die Berechnungen für die Variante basierend dem Referenzgebäude gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) ein ELD von 3,13 ha/a und ein spezifischer ELD" von $26,6 \text{ m}^2_{\text{ELD}}/\text{m}^2_{\text{NGFA}}$ und für die Ausführungsvariante ein ELD von 2,43 ha/a und ein spezifischer ELD" von $20,7 \text{ m}^2_{\text{ELD}}/\text{m}^2_{\text{NGFA}}$.
- Unter Anwendung von Optimierungsverfahren konnte der ELD für die vier Varianten auf folgende Werte reduziert werden: 1,04 ha/a v03a (Fernwärme), 0,50 ha/a v03a (Fernwärme mit Ökostrom), 1,22 ha/a v04a (Luft-Wasser-Wärmepumpe) und 0,49 ha/a v04b (Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Ökostrom).
- Basierend auf den Ergebnissen zeigt sich, dass der Anteil der Baukonstruktion an den Gesamtemissionen steigt, wenn das Gebäude eine erneuerbare Energieversorgung aufweist und parametrisch optimiert wurde.
- Die Erweiterung des Betrachtungshorizonts von der Gebäudeebene auf die Grundstücksebene zeigt, dass die Freifläche außerhalb des Gebäudes einen signifikanten Einfluss auf den ELD haben kann. Im Rahmen des Fallbeispiels zeigt sich, dass der Parkplatz zu einer Steigerung des ELD um bis zu 25 % führen kann. Die Implementierung Grüner Infrastruktur kann zu einer Reduktion um bis zu -45 % führen.
- Die Betrachtung der Anbaufläche von nachwachsenden Rohstoffen zur Bereitstellung der gesamten verbauten Holzmenge im Gebäude ergibt eine Waldfläche von 0,75 bis 0,81 ha/a. Im Vergleich zum gesamten ökologischen Flächenbedarf (ELD + Anbaufläche) zeigt sich, dass der relative Anteil der

Anbaufläche zwischen 42 % und 60 % betragen kann. Für die Umsetzung nachhaltiger Gebäude ist es daher notwendig, auch den Flächenbedarf der Rohstoffe zu berücksichtigen.

- Um die Ziele der Plusenergie und Klimaneutralität zu erreichen, ist die Erzeugung und Einspeisung von erneuerbar erzeugter Energie in das deutsche Stromnetz notwendig. Wird nur der Betrieb des Gebäudes betrachtet, so ergibt sich eine PV-Fläche von bis zu 416 m² (v01). Die geringsten PV-Flächen weisen die Varianten v03b mit 5 m² und v04b mit 3 m² auf. Wird der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet, so steigt die PV-Fläche auf bis zu 862 m² (v01) an. Durch eine erneuerbare Energieerzeugung im Betrieb und die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen für der Baukonstruktion kann die PV-Fläche auf 184 m² (v03b - FW Ökostrom) beziehungsweise 130 m² (v04b - LW-WP Ökostrom) reduziert werden.
- Wie dringlich eine Reduktion von Luftschadstoffen ist, zeigt sich anhand der ökologische Flächenbedarfe für den bundesweiten Bausektor. Der ökologische Flächenbedarf für das Treibhauspotenzial (GWP) umfasst die 1,6-fache (160 %) Fläche der bundesweiten Ökosysteme. Das heißt es werden mehr Ökosysteme beansprucht als es in Deutschland gibt. Für das Versauerungspotenzial (AP) werden insgesamt 40 % und für das Eutrophierungspotenzial (EP) insgesamt 6 % der bundesweiten Ökosysteme beansprucht.

8 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methode ermöglicht die Ermittlung und Optimierung des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) von Gebäuden basierend auf Lebenszyklusanalysen (LCA) und thermischen Gebäudesimulationen. Die Methode der LCA ist ein bewährtes Werkzeug zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Gebäuden über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg. Sie ermöglicht es, eine Vielzahl von Umweltindikatoren zu erfassen und die Ergebnisse in Form von komplexen Daten und Kennzahlen zu präsentieren. Allerdings können diese Ergebnisse für Nicht-Experten oft schwer zu verstehen sein. In diesem Zusammenhang bietet die Methode des ELD eine Möglichkeit, die komplexen Ergebnisse von Ökobilanzen in einer einfacheren und verständlicheren Form darzustellen. Der Fokus des ELD liegt auf der Einheit "Hektar"(ha), die besser verstanden und vermittelt werden kann. Durch die Verwendung der ha-Einheit werden die Umweltauswirkungen eines Gebäudes auf die Fläche umgerechnet, die benötigt wird, um diese Auswirkungen auszugleichen. Dies ermöglicht es, die Umweltindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) auf eine gemeinsame Basis zu bringen und in Bezug auf die Fläche an beanspruchten Ökosystemen zu interpretieren. Die Verwendung der ha-Einheit im ELD ermöglicht es, die Auswirkungen auf die Umweltbelastung visuell darzustellen und zu vergleichen. Dies kann die Kommunikation mit Planungsbeteiligten erleichtern, da sie eine einfachere Vorstellung von den Umweltauswirkungen des Gebäudes erhalten. Für den Bausektor eröffnet die Anwendung dieser Methode außerdem einen neuen Betrachtungshorizont. Dies ist besonders im Hinblick auf den Klima- und Umweltschutz von großer Bedeutung, da der Gebäudesektor für 35 % des weltweiten Energiebedarfs und für 38 % der weltweiten energiebedingten CO₂-Emissionen verantwortlich ist [1]. Um die definierten Klimaschutzziele der Europäischen Union (EU) und eine Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, werden Maßnahmen zur erneuerbaren Energieversorgung von Gebäuden und die Einspeisung von am Standort erzeugter, erneuerbarer Energie forciert [23, 24]. Vernachlässigt werden dabei anfallende Emissionen bei der Herstellung, Nutzung und dem Rückbau des Gebäudes. Des Weiteren werden Auswirkungen auf Ökosysteme vernachlässigt. Ansätze nach dem Konzept des positiven Bauens wie *Regenerative Design* und *Cradle to Cradle* fordern hinsichtlich Klima- und Umweltschutz die Umsetzung von ökologischen Kompensationsmaßnahmen. Diese Arbeit gliedert sich in das Themenfeld des positiven ökologischen Bauens ein und erweitert den Wissensstand bezüglich der Wirkung von Gebäuden auf Ökosysteme. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich eine Vielzahl an Erkenntnissen für die Umsetzung ökologisch positiver Gebäude ableiten:

- Durch Anwendung der entwickelten Methode anhand eines Fallbeispiels konnte der ökologische Flächenbedarf ermittelt, optimiert und visuell dargestellt werden. Im ersten Schritt wurde das Fallbeispiel in zwei verschiedenen Ausgangsvarianten analysiert. Die erste Variante (v01) repräsentiert den Mindeststandard nach dem Referenzgebäude des Gebäudeenergiegesetz (GEG). Die zweite

Variante (v02) stellt das Gebäude dar, wie es in Realität umgesetzt wurde. Variante v02 weist dabei einen höheren energetischen Standard sowie eine regenerative Energieversorgung (Luft-Wasser Wärmepumpe) auf. Für die untersuchten Varianten ergeben sich dabei folgende ökologische Flächenbedarfe: 3,13 ha/a (v01) und 2,43 ha/a (v02). Bezogen auf die gesamte Nettogrundfläche des Gebäudes (1.097 m²) bedeutet dies für v01, dass pro Quadratmeter Nettogrundfläche etwa 27 m² an Ökosystemen beansprucht werden. In Variante v02 werden pro Quadratmeter Nettogrundfläche etwa 21 m² an Ökosystemen beansprucht.

- Um aufzuzeigen, inwiefern der ELD optimiert werden kann, wurden weitere Gebäudevarianten definiert. Als Entscheidungsgrundlage dienen hierbei lebenszyklusbasierte Sensitivitätsanalysen und die Prinzipien zum positiven Bauen. Anhand der Erkenntnisse wurden für die weiteren Untersuchungen folgende Festlegungen definiert: Die Baukonstruktion der Optimierungsvarianten wird in einer Holz-Massiv-Bauweise ausgeführt, für die Energieversorgung werden zwei verschiedene Energiesysteme festgelegt (Fernwärme auf Basis von erneuerbaren Energieträgern und eine Luft-Wasser-Wärmepumpe), der Strommix wird anhand von zwei Szenarien berücksichtigt (Strom-Mix Szenario für 2020-2070 und Ökostrom mit Strom aus Wasserkraft). Insgesamt ergibt dies vier optimierte Varianten. Variante v03a (Fernwärme ohne Ökostrom), v03b (Fernwärme mit Ökostrom), v04a (Luft-Wasser Wärmepumpe ohne Ökostrom) und v04b (Luft-Wasser Wärmepumpe mit Ökostrom). Um die vier definierten Gebäudevarianten zu optimieren, wurden jeweils parametrische Optimierungsalgorithmen im Rahmen von thermischen Gebäudesimulationen angewendet.
- Unter Anwendung der parametrischen Optimierung konnte der ELD für die vier Varianten auf folgende Flächen reduziert werden: 1,04 ha/a (v03a), 0,50 ha/a (v03a), 1,22 ha/a (v04a) und 0,49 ha/a (v04b).
- Die Ergebnisse zeigen, dass der ELD zwar signifikant reduziert, allerdings kein positiver ökologischer Flächenbedarf erzielt werden konnte. Für die Umsetzung positiver ökologischer Gebäude bedeutet dies, dass ökologische Kompensationsmaßnahmen wie beispielsweise die Aufforstung und Renaturierung von Ökosystemen erforderlich ist. Um den positiven ökologischen Standard zu realisieren ist zudem eine Überkompensation erforderlich, das heißt, dass die Fläche an Kompensationsmaßnahmen größer sein muss als die durch das Gebäude beanspruchte Fläche.
- In Bezug auf ökologische Kompensationsmaßnahmen wurde zudem untersucht, inwiefern die Umsetzung Grüner Infrastruktur zur Reduktion des ökologischen Flächenbedarfs beiträgt. Unter Berücksichtigung eines Gründachs sowie einer Begrünung des gesamten Grundstücks kann der ELD in untersuchten allen Varianten um -0,22 ha/a reduziert werden. In Bezug auf die untersuchten Gebäudevarianten zeigt sich, dass die Umsetzung Grüner Infrastruktur erst dann einen signifikanten Einfluss auf den ELD hat, nachdem das Gebäude optimiert wurde. Dies zeigt sich an der relativen Reduktion des ELD von Variante v01 (-7 %) und Variante v04b (-45 %). Die Optimierung beinhaltet eine erneuerbare Energieversorgung sowie die überwiegende Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen.
- Gleichmaßen zeigt sich auch, dass sich im Falle einer vollständigen Asphaltierung des Grundstücks der ELD um bis zu +25 % (Variante v04b) erhöhen kann. Mit der zunehmenden ökologischen Optimierung des Gebäudes nimmt die Bedeutung und die Gestaltung des Grundstücks an Bedeutung zu.

- Die Erweiterung des Betrachtungshorizonts auf die notwendige Anbaufläche von nachwachsenden Rohstoffen ergibt eine Waldfläche von 0,75 bis 0,81 ha/a. Bezogen auf den gesamten ökologischen Flächenbedarf (ELD + Anbaufläche) lässt sich festhalten, dass die Anbaufläche einen signifikanten Anteil an der Gesamtfläche ausmacht. Die Anbaufläche beträgt dabei zwischen 42 % und 60 %.
- Anhand der gesamten Ergebnisse zeigt sich zudem, dass für den gesamten Flächenbedarf der Wirkungsindikator Treibhauspotenzial (GWP) die größte Bedeutung aufweist. Das heißt, dass ein Fokus auf die Reduktion von Treibhausgasen zur Umsetzung nachhaltiger Gebäude primär zielführend ist. Im Rahmen der Optimierung des Fallbeispiels zeigt sich allerdings, dass die Wirkungsindikatoren Versauerungspotenzial (AP) und Eutrophierungspotenzial (EP) deutlich an Bedeutung gewinnen und in Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden sollten.
- Im Hinblick auf die Ergebnisse der Vergleichsvarianten zeigt sich, dass der relative Anteil an Grauen Emissionen der Baukonstruktion im Vergleich zu den Gesamtemissionen steigt, wenn die Gebäude eine erneuerbare Energieversorgung aufweisen und/oder die wesentlichen Gebäudeparameter optimiert werden. Dadurch, dass die Baukonstruktion an Bedeutung gewinnt, nimmt gleichermaßen die Bedeutung des kreislaufgerechten Bauens und damit die Wieder- und Weiterverwendung von Baumaterialien und Baukonstruktionen zu.
- Zur Realisierung eines klimaneutralen Plusenergiegebäudes ist die Erzeugung und Einspeisung von erneuerbar erzeugter Energie in das deutsche Stromnetz notwendig. Unter Berücksichtigung des Betriebs ergibt sich eine PV-Fläche von bis zu 416 m² (v01). Sofern die Systemgrenze auf den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes erweitert wird, so steigt die PV-Fläche auf bis zu 862 m² (v01) an. Eine signifikante Reduktion der PV-Fläche ist durch die Verwendung einer erneuerbaren Energieerzeugung im Betrieb und von nachwachsenden Rohstoffen in der Baukonstruktion möglich. Die PV-Flächen können dabei auf 130 m² (v04b - LF-WP Ökostrom) beziehungsweise 184 m² (v03b - FW Ökostrom) reduziert werden.

Im Hinblick auf den Gebäudesektor und insbesondere auf die aktuelle Planungspraxis stellen die Ergebnisse eine deutliche Erweiterung des Betrachtungshorizonts dar. Zusammenfassend ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Gebäude und deren Umweltwirkungen müssen lebenszyklusbasiert analysiert und optimiert werden. Ohne die Anwendung der LCA werden große Teile der Umweltwirkungen, beispielsweise die Graue Energie und Emissionen der Baukonstruktion und den Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung vernachlässigt. Es ist daher zwingend erforderlich, die LCA in den Planungsprozess zu integrieren und baurechtlich zu fordern.
- Bestehende Umsetzungsstrategien zum positiven Bauen sind in der Bauleitplanung formuliert, denn Eingriffe und Schäden am Naturbild und der Biodiversität sind dabei vorrangig zu vermeiden. Sind Eingriffe nicht zu vermeiden, so sind die Schäden und Eingriffe durch ökologische, mindestens gleichwertige Maßnahmen zu kompensieren. Diese Herangehensweise basiert maßgeblich auf dem Konzept des *Restorative Design*, bei dem Ökosysteme wiederhergestellt werden und die lokale Biodiversität und Flora und Fauna eine zentrale Rolle einnehmen. In Bezug auf die Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen zeigt die aktuelle Studienlage gravierende Defizite auf. Maßnahmen werden oft nicht im definierten Umfang umgesetzt und instandgehalten. Dies lässt sich auf eine

mangelnde Kontrolle der Maßnahmen zurückführen. Wie einige Studien zeigen, müssen Maßnahmen kontrolliert werden, um die ökologische Wirksamkeit zu gewährleisten.

- In Bezug auf den bundesweiten Gebäudesektor ergibt sich anhand der Berechnungen zum ELD ein Anteil der beanspruchten bundesweiten Ökosysteme von 160 % (basierend auf dem GWP). Für AP ergibt sich ein Anteil von 40 % und für EP von 6 %. Das bedeutet, dass ein signifikanter Teil der Ökosysteme durch den Bausektor beansprucht werden und dass die gesamte Fläche der bundesweiten Ökosysteme nicht ausreicht, um die jährlichen Emissionen des Bausektors zu binden.
- Hinsichtlich der baurechtlichen Mindestanforderungen gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) ist nur eines der identifizierten Handlungsfelder erkennbar (Energie). Im Rahmen des GEG bestehen Mindestanforderungen an die bauphysikalische Qualität der thermischen Gebäudehülle und an den jährlichen Primärenergiebedarf. Hinsichtlich der Energiebereitstellung wird dabei ein Mindestanteil an erneuerbaren Energien gefordert. Ein lebenszyklusbasierter Ansatz, welcher auch die Graue Energie und Emissionen von Komponenten der Baukonstruktion und der Technischen Gebäudeausrüstung berücksichtigt, fehlt. Dies führt dazu, dass große Teile an Grauer Energie und Emissionen nicht betrachtet werden. Dadurch, dass im Planungsprozess der Fokus nur auf dem Energiebedarf der Nutzungsphase liegt, werden Umweltwirkungen und mögliche Umweltentlastungspotenziale der Baukonstruktion vernachlässigt. Des Weiteren werden die Handlungsfelder Wasser, Gesundheit, Emissionen und Biodiversität nur punktuell im Rahmen von Zertifizierungssystemen berücksichtigt.

8.2 Fazit

Die Ergebnisse dieser Dissertation führen zu folgendem Fazit:

- Im Hinblick auf den Klima- und Umweltschutz ist der Gebäudesektor von wesentlicher Bedeutung. Um nachhaltige Gebäude umzusetzen und notwendige Umweltentlastungspotenziale zu erreichen, ist die lebenszyklusbasierte Betrachtung im Planungsprozess unter Berücksichtigung aller Komponenten und Bestandteile des Gebäudes zwingend erforderlich.
- Die entwickelte Methode zur Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs stellt eine systematische Verbindung zwischen den zwei Bereichen des *Building Performance Modeling* und dem *Ecological Modeling* dar. Hierdurch wird eine ökosystem-spezifische Interpretation und Bewertung von Ergebnissen einer Lebenszyklusanalyse (LCA) ermöglicht.
- Hinsichtlich des Klima- und Umweltschutzes liefern bestehende Konzepte zum positiven Bauen Umsetzungsstrategien, die zielführend bei Gebäuden umgesetzt werden können. Hierdurch können bedeutende Umweltentlastungspotenziale erzielt werden. Um jedoch ökologisch positive Gebäude hinsichtlich des ökologischen Flächenbedarfs zu realisieren, bedarf es einer Überkompensation.
- Das Konzept zum ökologischen Flächenbedarf muss durch weitere Flächenbedarfe wie beispielsweise die Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe oder die Fläche für einer erneuerbare Energieversorgung systematisch erweitert werden.

In Bezug auf die Forschungsfragen ergeben sich folgende Antworten:

- **Forschungsfrage 1:** Wie definiert sich positives ökologisches Bauen und welche Handlungsfelder lassen sich hierfür identifizieren?

Antwort: Positives Bauen umfasst nach aktuellem Stand die Konzepte *Cradle to Cradle*, *Restorative Design* und *Regenerative Design*. Basierend auf den identifizierten Quellen wird unter positivem Bauen verstanden, dass im Rahmen der Herstellung, Nutzung und Rückbau eines Gebäudes keine negativen, sondern positive Wirkungen auf Mensch und Natur erzielt werden. Hierbei lassen sich für das ökologisch positive Bauen die Handlungsfelder Energie, Materialien, Wasser, Gesundheit, Emissionen und Biodiversität identifizieren.

- **Forschungsfrage 2:** Inwiefern sind Aspekte des positiven Bauens bereits in der Gebäudeplanung baurechtlich gefordert?

Antwort: Aspekte des positiven Bauens sind in Form der ökologischen Kompensation in der Bauleitplanung und der Umsetzung eines Mindestanteils an erneuerbaren Energien im Gebäudeenergiegesetz (GEG) gefordert. Weitere Aspekte hinsichtlich der Handlungsfelder Materialien, Wasser, Gesundheit, Emissionen und Biodiversität fehlen.

- **Forschungsfrage 3:** Ist es möglich, basierend auf Lebenszyklusanalyse (LCA) den ökologischen Flächenbedarf in Bezug auf Ökosysteme von Gebäuden zu ermitteln?

Antwort: Durch die entwickelte und beschriebene Methode lässt sich der ökologische Flächenbedarf auf Basis von Lebenszyklusanalysen (LCA) ermitteln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die verwendeten ökosystem-spezifischen Kennwerte regional unterscheiden. Darüber hinaus unterliegen Ökosysteme zeitlichen Änderungen, das heißt, die ökosystem-spezifischen Kennwerte können sich zukünftig ändern, was dazu führt, dass sich der ökologische Flächenbedarf ändert.

- **Forschungsfrage 4:** Welche Potenziale bieten lebenszyklusbasierte parametrische Optimierungen von Gebäuden in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf?

Antwort: Die Anwendung von Optimierungsverfahren in der thermischen Gebäudesimulation liefern weitreichende Potenziale zur Unterstützung des Planungsprozesses, Entwicklung von Entwurfparametern und zur Reduktion des ökologischen Flächenbedarfs. Durch die lebenszyklusbasierte Betrachtung von Gebäuden erhöht sich die Komplexität enorm. Die Anzahl an relevanten Gebäudeparametern kann hierbei mit gängigen konventionellen und statischen Berechnungsmethoden nicht zielführend optimiert werden. Optimierungsverfahren bieten hierbei eine geeignete Methode zur Reduzierung der Simulationszeiten und ganzheitlichen Optimierung unter Berücksichtigung der komplexen Zusammenhänge zwischen den Parametern. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Optimierungen berücksichtigten insgesamt 12 Parameter mit rund $1,5 \times 10^{14}$ möglichen Lösungen. Der ökologische Flächenbedarf konnte hierbei durch die Anwendung von Optimierungsverfahren bezogen auf die Ausgangsvariante um rund 85 % reduziert werden.

In Bezug auf die Forschungshypothesen ergeben sich folgende Fazite:

- **Forschungshypothese 1:** Konzepte des positiven Bauens werden in der Gebäudeplanung hinreichend baurechtlich gefordert.

Fazit: Diese Forschungshypothese kann nicht verifiziert werden. Prinzipien zum positiven Bauen sind nach aktuellem Stand des Baurechts noch nicht hinreichend gefordert. Punktuell lassen sich Aspekte zum positiven Bauen erkennen, wie beispielsweise die Notwendigkeit der ökologischen Kompensation in der Bauleitplanung und dem Mindestanteil an erneuerbaren Energien im Rahmen des Gebäudeenergiegesetz. In Bezug auf den Klimaschutz sind erneuerbare Energien jedoch in unzureichender Weise gefordert. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Handlungsfelder Material, Wasser, Gesundheit, Emissionen, Biodiversität und Landnutzung baurechtlich gar nicht oder nur punktuell berücksichtigt werden. Zertifizierungssysteme erweitern zwar den baurechtlichen Betrachtungshorizont und setzen Prinzipien um, die eine Transformation hin zu nachhaltigerem Bauen zu ermöglichen. Allerdings berücksichtigen sie derzeit noch nicht ausreichend die Aspekte des positiven Bauen. Global stellt die Living Building Challenge das am weitest entwickelte Zertifizierungssystem hinsichtlich positivem Bauen dar.

- **Forschungshypothese 2:** Lebenszyklusanalysen (LCA) bieten eine ausreichende Grundlage zur Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs.

Fazit: Die Hypothese, dass Lebenszyklusanalysen eine ausreichende Grundlage zur Ermittlung des ökologischen Flächenbedarfs liefern, kann verifiziert werden. Die systematische Verknüpfung der Mid-Point Indikatoren GWP, AP und EP mit den identifizierten ökosystem-spezifischen Kennwerten, stellt eine geeignete Grundlage zur Entwicklung des End-Point Indikators ELD dar. Mit dieser methodischen Verknüpfung ist es möglich, Ergebnisse aus Lebenszyklusanalysen mit Eigenschaften von Ökosystemen zu verknüpfen.

- **Forschungshypothese 3:** Durch Sensitivitätsanalysen und lebenszyklusbasierte parametrische Optimierungen können Umsetzungsstrategien für Gebäude mit einem positiven ökologischen Flächenbedarf abgeleitet werden.

Fazit: Sensitivitätsanalysen und parametrische Optimierungen stellen bedeutende Werkzeuge in der Planung und Umsetzung von Gebäuden dar, mit denen bereits in frühen Planungsphasen wichtige Erkenntnisse über die Entwurfsparameter erzielt werden können. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen können frühzeitig relevante Parameter mit hohem Einfluss auf den ökologischen Flächenbedarf identifiziert werden. Gleichzeitig können Parameter ohne signifikanten Einfluss aus der Optimierung ausgeschlossen und somit die Simulationsmodelle vereinfacht werden. Dies führt zu einer Reduktion der Simulationszeiten. Im Rahmen dieser Dissertation konnte allein durch die Anwendung von Optimierungsverfahren kein positiver ökologischer Flächenbedarf ermittelt werden. Die Forschungshypothese kann daher nicht verifiziert werden. Die Umsetzung von Gebäuden mit einem positiven ökologischen Flächenbedarf erfordert zum einen die Erweiterung des Betrachtungshorizonts über das Gebäude hinaus und zum anderen die Umsetzung von ökologischen Kompensationsmaßnahmen.

8.3 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Herausforderungen des Klima- und Umweltschutzes nicht nur mit technischen Lösungen erreicht werden können. Maßnahmen, wie beispielsweise die Einspeisung von erneuerbar erzeugtem Strom in das deutsche Stromnetz und entsprechende Gutschriften stellt eine mögliche Maßnahme dar, um die Klimaneutralität zu erreichen. Dabei werden allerdings die real anfallenden Emissionen und deren Wirkung auf Mensch und Natur vernachlässigt. Um Gebäude und Städte nachhaltig und ökologisch positiv planen und umsetzen zu können, muss der aktuelle Betrachtungshorizont um die identifizierten Handlungsfelder erweitert werden. Darüber hinaus müssen baurechtliche Anforderungen die Belange des Umweltschutzes berücksichtigen. In Bezug auf die baurechtlichen Regelungen müssen höhere Anforderungen formuliert werden, um Umweltentlastungspotenziale zu forcieren. Hinsichtlich des Energiesystems ist es zwingend notwendig, den geforderten Anteil an erneuerbaren Energien deutlich zu erhöhen und auf eine vollständig erneuerbare Energieversorgung zu setzen. Dem einhergehend ist eine Beschleunigung der Transformation zu einem erneuerbaren Energienetz zwingend erforderlich. Denn dabei kann nicht nur der Energiebedarf eines Gebäudes durch erneuerbare Energien gedeckt werden, sondern auch Prozesse in der Herstellung von Materialien, Baukonstruktionen und sonstigen Komponenten. Des Weiteren muss die Baukonstruktion in die baurechtlichen Anforderungen aufgenommen werden. Hierbei ist eine Lebenszyklusbetrachtung des gesamten Gebäudes zwingend erforderlich. In Bezug auf die Lebenszyklusbetrachtung und den Konzepten zum positiven Bauen ergibt sich folgende weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarfe:

- Lebenszyklusanalyse: Die Lebenszyklusanalyse muss methodisch weiterentwickelt werden, um die Prozesse einer Kreislaufwirtschaft realitätsnaher abbilden zu können.
- Multikriterielle Bewertung: Gebäude, Quartiere und Städte können anhand einer Vielzahl von Parametern charakterisiert werden, die unterschiedliche Einheiten aufweisen. Das Problem besteht darin, diese Parameter miteinander zu vergleichen, da sie unterschiedliche Maßeinheiten verwenden, wie beispielsweise Energiebedarf in kWh und Treibhausgasemissionen in kg CO₂. In diesem Zusammenhang können Methoden zur multikriteriellen Analyse hilfreich sein, da sie die Vergleichbarkeit und Bewertung ermöglichen. Allerdings müssen für den Gebäudesektor noch geeignete Methoden entwickelt werden, um eine effektive Bewertung und Vergleichbarkeit der verschiedenen Parameter zu gewährleisten.
- Ökosysteme und Biodiversität: Die klassische Lebenszyklusanalyse stellt aktuell ein Werkzeug und eine Methode zur Quantifizierung von Umweltwirkungen auf Gebäudeebene dar. Dabei werden allerdings nur Energien und Emissionen quantifiziert. Hinsichtlich Ökosysteme und Biodiversität ist es zwingend erforderlich, dass im Rahmen der Umsetzung von Gebäuden, Quartieren und Städten diesem Aspekt mehr Bedeutung beigemessen wird. Ökosysteme liefern für den Menschen lebensnotwendige Ökosystemdienstleistungen, die es zu schützen und wiederherzustellen gilt. Daher ist die Implementierung dieser Aspekte zwingend erforderlich, wie auch beispielsweise Pedersen Zari aufzeigt [237].
- Ressourcen: Im Rahmen der Lebenszyklusbetrachtung muss der Betrachtungshorizont auf die verwendeten stofflichen Ressourcen erweitert werden. Zum aktuellen Stand können in Lebenszyklusanalysen die energetischen Ressourcen hinreichend abgebildet werden. Stoffliche Ressourcen werden lediglich über den Anteil an Grauer Energie und Emissionen abgebildet. Darauf aufbauend

besteht Forschungsbedarf, wie Sekundärmaterialien und die Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen in der Lebenszyklusanalyse berücksichtigt werden können.

- Restorative Design: Restorative Design stellt ein maßgebliches Konzept in der Transformation hin zu einem vollständigen regenerativen Bausektor dar. Eingriffe und Umweltwirkungen müssen zielgerichtet ökologisch kompensiert werden. Hierzu bedarf es einer wirkungsorientierten Umsetzung von Maßnahmen. Gutschriften durch das Einspeisen von erneuerbarem Strom führen zu keinen direkten Umweltentlastungspotenzialen und müssen daher zwingend durch ökologische Maßnahmen erweitert werden. Ökosysteme liefern für Mensch und Tier überlebensnotwendige Ökosystemdienstleistungen, die auch so anerkannt und verstanden werden müssen.
- Positives Bauen: Bestehende Konzepte zum positiven Bauen weisen aktuell noch sozio-kulturelle, technische und rechtliche Hürden auf. Zur Lösung der sozio-kulturellen Hürden bedarf es einer verständlichen Aufbereitung der zugrundeliegenden Problematik, den Inhalten und der Kommunikation von Ergebnissen.
- Mainstreaming: Fachliche Inhalte müssen wissenschaftlich so aufbereitet werden, dass diese durch ein geeignetes Mainstreaming an Interessierte und die Gesellschaft weitergetragen werden können. Initiativen wie die Arbeitsgruppen der *Cradle to Cradle* NGO und den *Architects for Future* liefern auf einer ehrenamtlichen Basis herausragende und wichtige Arbeit. In Bezug auf die technischen und rechtlichen Hürden müssen Lösungen weiterentwickelt und in Reallaboren getestet und umgesetzt werden. Hierzu braucht es einerseits geeignete Forschungsprojekte und andererseits Ingenieurbüros, die Prinzipien zum positiven Bauen in die Planungspraxis überführen. Im Hinblick auf die baurechtlichen Anforderungen ist der nächste notwendige Schritt die Implementierung und Verknüpfung der Lebenszyklusbetrachtung mit dem Gebäudeenergiegesetz (GEG).
- Software: IDA ICE stellt im Rahmen der thermischen und energetischen Simulation und Optimierung von Gebäuden eine geeignete und valide Software dar. Der Vorteil von IDA ICE besteht darin, dass die Gebäude, die Nutzenden, die Anlagentechnik sowie deren Regelung und Steuerung sehr detailliert modelliert und simuliert werden können. Der Betrachtungshorizont beschränkt sich dabei allerdings auf die Gebäudeebene. Die Erweiterung des Betrachtungshorizonts (bspw. auf Grundstücks- oder Quartiersebene) ermöglicht die Bewertung verschiedenster Indikatoren (bspw. Grünflächen) und eröffnet somit den Raum für potenzielle neue Lösungen zur Umsetzung von nachhaltigen Gebäuden, Quartieren und Städten. Für weitere Arbeiten können daher andere Softwarelösungen wie beispielsweise urbi+ [79], Grasshopper für Rhino [238] oder das Urban Modelling Interface (umi) [239] in Betracht gezogen werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Weltweiter Anteil an Endenergie und CO ₂ -Emissionen im Bauwesen, Stand 2019 (Quelle: in Anlehnung an [1]; leicht modifiziert)	5
3.1	Ablaufdiagramm der Forschungsarbeit (eigene Abbildung)	13
4.1	Darstellung des biologischen und technischen Kreislaufes nach dem Cradle to Cradle Konzept (Quelle: [68])	19
4.2	Schematische Darstellung und Einordnung von Ansätzen zur Öko-Effizienz und Öko-Effektivität anhand der negativen oder positiven Wirkung (Quelle: in Anlehnung an [42]; stark modifiziert)	22
4.3	Vergleich untersuchter Konzepte im Hinblick auf deren Mehrwerte (Quelle: in Anlehnung an [69]; leicht modifiziert)	24
4.4	Zeitlicher Verlauf der Implementierung von Konzepten zum positiven Bauen am Fallbeispiel Neuseeland (Quelle: [69])	27
6.1	Übersicht über die methodischen Schritte (eigene Darstellung)	53
6.2	Darstellung der klassischen Lebenszyklusanalyse (LCA) bestehend aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung sowie der im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten methodischen Erweiterung um den ökologischen Flächenbedarf (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [168])	54
6.3	Einzelne Lebenszyklusphasen von Gebäuden (Quelle: [4])	57
6.4	Absorbiertes CO ₂ in t CO ₂ /(ha a) nach Altersklassen und Baumart; TA = Tanne, DGL = Douglasie, FI = Fichte, LAE = Lärche, KI = Kiefer, BU = Buche, aLH = andere Laubbäume mit hoher Lebensdauer, EI = Eiche, aLN = andere Laubbäume mit niedriger Lebensdauer (Quelle: [185])	66
6.5	Sensitivität der ökologischen Belastungsgrenzen (CL) für eutrophierenden Stickstoff verschiedener Ökosysteme gemäß in kg N/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [184])	70
6.6	Sensitivität der ökologischen Belastungsgrenzen (CL) für versauernden Schwefel verschiedener Ökosysteme in kg S/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [184])	73
6.7	Darstellung der Ermittlung der einzelnen ökologischen Flächenbedarfe je Wirkungsindikator und je Ökosystem (eigene Darstellung)	76
6.8	Darstellung der Ermittlung des gesamten ökologischen Flächenbedarfs (ELD) basierend auf den einzelnen Maxima je Ökosystem (eigene Darstellung)	79
6.9	Schematische Darstellung der Abfolge und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Objekten und mathematischen Operatoren des Graphical Scriptings in IDA ICE (eigene Darstellung)	80

6.10 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen im Objekt der Baukonstruktion (BK); schwarze Linie = Input aus Gebäudemodell, gestrichelte Linie = Input aus Datenbank ÖKOBAUDAT, gepunktete Linie = Output aus dem Element für den jeweiligen Wirkungsindikator (eigene Darstellung)	82
6.11 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen im Objekt der Technischen Gebäudeausrüstung Technische Gebäudeausrüstung (TGA); schwarze Linie = Input aus Gebäudemodell, gestrichelte Linie = Input aus Datenbank ÖKOBAUDAT, gepunktete Linie = Output aus dem Element für den jeweiligen Wirkungsindikator (eigene Darstellung)	83
6.12 Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Elementen im Objekt der Nutzungsphase; schwarze Linie = Input aus Gebäudemodell, gestrichelte Linie = Input aus Datenbank ÖKOBAUDAT, gepunktete Linie = Output aus dem Element für den jeweiligen Wirkungsindikator (eigene Darstellung)	84
6.13 Übersicht über die einzelnen methodischen Schritte (eigene Darstellung)	85
6.14 Darstellung einer mathematischen Funktion mit lokalen und globalen Minima und Maxima (Quelle: [210])	86
6.15 Schematische Darstellung der zufällig initiierten Partikel (Lösungen) im gesamten Suchraum (Quelle: [213])	87
6.16 Schematische Darstellung der Partikel (Lösungen) und deren Geschwindigkeits- und Richtungsvektoren (Quelle: [213])	88
6.17 Schematische Darstellung der einzelnen Partikel (Lösungen), die sich um das globale Optimum anordnen (Quelle: [213])	88
6.18 Darstellung einer Optimierung mit dem Hooke-Jeeves (HJ)-Verfahren: das Optimierungsverfahren tastet dabei in kleinen Schritten in einer definierten Richtung voran und untersucht, ob der Testschritt hinsichtlich der definierten Zielfunktion zu einer Optimierung geführt hat. Auf einen erfolgreichen Tastschritt folgt das Voranschreiten (Quelle: [214])	90
7.1 Außenansicht des Fallbeispiels (Fotoquelle: © Bauer bauerwerner.com)	94
7.2 Exemplarischer Grundriss des ersten Obergeschosses des Fallbeispiels; dargestellt sind die Verkehrsflächen (in weiß), Sanitärflächen (in blau) und Büros (in orange)	94
7.3 Verteilung des Treibhauspotenzials (GWP) in kg CO ₂ -Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der Vergleichsvarianten v01 und v02 für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	101
7.4 Verteilung des Versauerungspotenzials (AP) in kg SO ₂ -Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der Vergleichsvarianten v01 und v02 für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	102
7.5 Verteilung des Eutrophierungspotenzials (EP) in kg Phosphat-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der Vergleichsvarianten v01 und v02 für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	103
7.6 Verteilung der ökologischen Flächenbedarfs (ELD) auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v01 (GEG) (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	105

7.7	Verteilung der ELD auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v02 (Ausführung) (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren)(eigene Darstellung)	107
7.8	Ergebnis der Berechnungen zur Sensitivität der definierten Parameter in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf ELD anhand von Boxplots (eigene Darstellung)	111
7.9	Darstellung der Einflüsse untersuchter Parameter auf den ökologischen Flächenbedarf ELD. Dargestellt sind Dicke der Wärmedämmung für die Außenwand und Dach (a), U-Wert der Fensterrahmen (b), U-Wert der Verglasung (c), Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung (d), Luftdichtigkeit (e) und die Fläche der Photovoltaik- bzw. Solarthermieanlage (f)	113
7.10	Vergleich verschiedener Bauweisen in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf ELD des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	114
7.11	Vergleich verschiedener Energiesysteme in Bezug auf den ökologischen Flächenbedarf ELD des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	115
7.12	Vergleich verschiedener Strommix-Szenarien in Bezug auf den lebenszyklusbasierten ökologischen Flächenbedarf ELD des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	116
7.13	Darstellung der Ergebnisse aus den parametrischen Optimierungen anhand der einzelnen simulierten Varianten des Gesamtgebäudes (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	120
7.14	Vergleich des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) zwischen den untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	121
7.15	Vergleich des spezifischen ökologischen Flächenbedarfs (ELD") für die verschiedenen untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	122
7.16	Visuelle Darstellung des spezifischen ökologischen Flächenbedarfs (ELD") für die verschiedenen untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (Quelle: [222]; leicht modifiziert)	123
7.17	Verteilung des Treibhauspotenzials (GWP) in kg CO ₂ -Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v03a und v03b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	125
7.18	Verteilung des Versauerungspotenzials (AP) in kg SO ₂ -Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v03a und v03b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	126
7.19	Verteilung des Eutrophierungspotenzials (EP) in kg Phosphat-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v03a und v03b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	127

7.20	Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe (ELD) auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v03a (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	128
7.21	Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe (ELD) auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v03b (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	129
7.22	Verteilung des Treibhauspotenzials (GWP) in kg CO ₂ -Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v04a und v04b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	131
7.23	Verteilung des Versauerungspotenzials (AP) in kg SO ₂ -Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v04a und v04b) (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	132
7.24	Verteilung des Eutrophierungspotenzials (EP) in kg Phosphat-Äq. auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten der untersuchten Gebäudevarianten und Optimierungsvarianten (v04a und v04b) über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren (eigene Darstellung)	133
7.25	Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe ELD auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v04a (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	134
7.26	Verteilung der ökologischen Flächenbedarfe ELD auf die unterschiedlichen Ökosysteme für das Gesamtgebäude der Variante v04b (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	135
7.27	Darstellung des Endenergiebedarfs und des ökologischen Flächenbedarfs (ELD) für die durchgeführten Optimierungen folgender Varianten: v03a - Fernwärme (a), v03b - Fernwärme mit Ökostrom (b), v04a - Luft-Wasser Wärmepumpe (c) und v04b - Luft-Wasser Wärmepumpe mit Ökostrom (d)	137
7.28	Schematische Darstellung der bestehenden Freiflächen auf dem Gebäudegrundstück (Quelle: [224]; leicht modifiziert)	139
7.29	Darstellung des Einflusses der bestehenden Freiflächen auf den ELD aller untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	140
7.30	Schematische Darstellung der potenziellen Grünflächen auf dem Gebäudegrundstück (Quelle: [224]; leicht modifiziert)	141
7.31	Darstellung des Einflusses Grüner Infrastruktur auf den ELD aller untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) (eigene Darstellung)	143
7.32	Visuelle Darstellung des ökologischen Flächenbedarfs ELD (in grün) und der Anbaufläche für die nachwachsenden Rohstoffe (in schwarz) für die verschiedenen untersuchten Gebäudevarianten (Quelle: [222]; leicht modifiziert)	144

7.33 Vergleich der untersuchten Gebäudevarianten hinsichtlich der definierten Dekarbonisierungsziele für die globale Erwärmung von maximal 1,5 °C (gestrichelte Linie, blau) und 2,0 °C (gestrichelte Linie, orange) anhand der CRREM-Kurven [233] (eigene Darstellung)	145
7.34 Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha/a des bundesweiten Gebäudesektors basierend auf dem Endenergiebedarf des Betriebs von Gebäuden (eigene Darstellung)	148
7.35 Beanspruchte Fläche in % an bundesweiten Ökosystemen durch den Gebäudesektor basierend auf dem Endenergiebedarf des Betriebs von Gebäuden (eigene Darstellung)	149

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Klimaschutzziele für Deutschland, Europa und im internationalen Kontext in Bezug auf die Treibhausgasemissionen (THG) gegenüber dem Basisjahr 1990 (Quelle: in Anlehnung an [46]); leicht modifiziert)	6
2.2	Anforderungen an die Reduktion von Emissionen auf Basis des Göteborg-Protokolls [52] gegenüber dem Basisjahr 2005 (Quelle: in Anlehnung an [53]; leicht modifiziert)	8
4.1	Chronologischer Überblick über relevante Meilensteine hinsichtlich <i>Regenerative Design</i> und <i>positives Bauen</i> , sowie punktuell ergänzt durch weitere Quellen (Quelle: in Anlehnung an [42]; leicht modifiziert)	16
4.2	Vergleich der Merkmale beschriebener Konzepte zum positiven Bauen in Bezug auf die Gebäudeebene (Quelle: in Anlehnung an [69]; leicht modifiziert)	23
4.3	Handlungsfelder und Merkmale ökologisch positiver Gebäude (eigene Darstellung)	29
5.1	Einstufung des Bewertungskriteriums Seltenheit und Gefährdung (Quelle: [113])	38
5.2	Einschätzung zur Wiederherstellbarkeit und der notwendigen Entwicklungsdauer (Quelle: [113])	39
5.3	Einschätzung zur Natürlichkeit (Quelle: in Anlehnung an [113]; leicht modifiziert)	40
5.4	Bewertung der Umsetzungsqualität von Kompensationsmaßnahmen (Quelle: [125])	41
5.5	Qualitative Bewertung von Zertifizierungssystemen inwiefern Prinzipien zum positiven ökologischen Bauen erkennbar sind (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [140])	44
5.6	Vergleich von Studien hinsichtlich der Berechnung des ökologischen Fußabdrucks auf Basis von Gebäude-Ökobilanzen	49
6.1	Flächen von Ökosystemen in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [174–176])	64
6.2	Kohlenstoffdioxid-Bindungskapazität (SeqR) verschiedener Ökosysteme in t CO ₂ /(ha a) (eigene Darstellung)	68
6.3	Ökologische Belastungsgrenze (CL) für eutrophierenden Stickstoff verschiedener Ökosysteme in kg N/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [19, 184, 198, 199])	71
6.4	Ökologische Belastungsgrenze (CL) für versauernden Schwefel verschiedener Ökosysteme in kg S/(ha a) (Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von [184, 203])	74
7.1	Randbedingungen der Gebäudenutzung für Heizung und Kühlung	96
7.2	Randbedingungen der Gebäudenutzung für Fensterlüftung	97
7.3	Eigenschaften des verwendeten Datensatzes zum Testreferenzjahre TRY-2015	97
7.4	Angaben zur Baukonstruktion und der Technischen Gebäudeausrüstung der beiden Grundvarianten v01 und v02	98

7.5	Wärmedurchgangskoeffizienten der beiden Grundvarianten	99
7.6	Treibhauspotenzial (Treibhauspotenzial (GWP)) in kg CO ₂ -Äq. für die Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung), dargestellt getrennt nach den verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten des Gebäudes	100
7.7	Versauerungspotenzial (Versauerungspotenzial (AP)) in kg SO ₂ -Äq. für die Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung), dargestellt getrennt nach den verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten des Gesamtgebäudes	101
7.8	Eutrophierungspotenzial Eutrophierungspotenzial (EP) in kg Phosphat-Äq. für die Vergleichsvarianten v01 (GEG) und v02 (Ausführung), dargestellt getrennt nach den verschiedenen Lebenszyklusphasen und Komponenten des Gesamtgebäudes	103
7.9	Ökologischer Flächenbedarf der Variante v01 (GEG) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme	104
7.10	Ökologischer Flächenbedarf der Variante v02 (Ausführung) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme	106
7.11	Auflistung der Parameter und deren Variationsbereiche	108
7.12	Untersuchte Baukonstruktionsarten des Parameters 20: Art der Baukonstruktion	109
7.13	Angaben zur Technischen Gebäudeausrüstung der Varianten v03a/v03b und v04a/v04b	118
7.14	Auflistung der Parameter und deren Variationsbereiche für die parametrische Optimierung	119
7.15	Auflistung der Parameter und der definierte Fixwerte	119
7.16	Gegenüberstellung der Gebäudeparameter zwischen den Vergleichsvarianten v01 (GEG), v02 (Ausführung) und den beiden optimierten Gebäudevarianten v03a (FW) und v03b (FW mit Ökostrom)	124
7.17	Gegenüberstellung der Gebäudeparameter zwischen den Vergleichsvarianten v01 (GEG), v02 (Ausführung) und den optimierten Gebäudevarianten v04a (LW-WP) und v04b (LW-WP mit Ökostrom)	130
7.18	Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse des Parkplatzes	139
7.19	CO ₂ -Bindungsvermögen von Dachbegrünungen	142
7.20	Darstellung der Fläche für die nachwachsenden Rohstoffe in Bezug zum ELD aller untersuchten Gebäudevarianten (umfasst die Lebenszyklusphasen A-C über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren)	144
7.21	Treibhauspotenzial (GWP) und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) der untersuchten Varianten und die notwendige PV-Fläche zur Realisierung eines klimaneutralen Plusenergiegebäudes im Betrieb	146
7.22	Treibhauspotenzial (GWP) und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT) der untersuchten Varianten und die notwendige PV-Fläche zur Realisierung eines klimaneutralen Plusenergiegebäudes über den gesamten Lebenszyklus	146
7.23	Umweltwirkungen des bundesweiten Gebäudesektors basierend auf der Endenergiebilanz für das Jahr 2020 nach [234]	147
A.1	Treibhauspotenzial der optimierten Fernwärme Varianten	191
A.2	Versauerungspotenzial der optimierten Fernwärme Varianten	191
A.3	Eutrophierungspotenzial der optimierten Fernwärme Varianten	192

A.4	Ökologischer Flächenbedarf der Variante v03a (FW) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme	192
A.5	Ökologischer Flächenbedarf der Variante v03b (FW mit Ökostrom) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme	193
A.6	Treibhauspotenzial der optimierten Wärmepumpe Varianten; Angegeben sind die absoluten Werte, die jeweiligen Standardabweichungen SD und die relativen Anteile an den Gesamtemissionen	193
A.7	Versauerungspotenzial der optimierten Wärmepumpe Varianten	194
A.8	Eutrophierungspotenzial der optimierten Wärmepumpe Varianten	194
A.9	Ökologischer Flächenbedarf der Variante v04a (LW-WP) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme	195
A.10	Ökologischer Flächenbedarf der Variante v04b (LW-WP Ökostrom) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme	195
A.11	ELD des bundesweiten Bausektors in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme	195
B.1	Außenwand der Variante v01	197
B.2	Bodenplatte der Variante v01	198
B.3	Dach der Variante v01	198
B.4	Decken der Variante v01	198
B.5	Innenwand (Massiv) der Variante v01	199
B.6	Innenwand (Leicht) der Variante v01	199
B.7	Außenwand EG der Variante v02	199
B.8	Außenwand 1.OG der Variante v02	200
B.9	Außenwand 2.OG der Variante v02	200
B.10	Bodenplatte der Variante v02	200
B.11	Dach der Variante v02	201
B.12	Decken der Variante v02	201
B.13	Innenwand (Massiv) der Variante v02	201
B.14	Innenwand (Leicht) der Variante v02	201
B.15	Außenwand der Varianten v03 und v04	202
B.16	Bodenplatte der Varianten v03 und v04	202
B.17	Dach der Varianten v03 und v04	202
B.18	Decken der Varianten v03 und v04	203
B.19	Innenwand (Massiv) der Varianten v03 und v04	203
B.20	Innenwand (Leicht) der Varianten v03 und v04	203
B.21	Verwendete Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung	204
B.22	Verwendete Datensätze für den Asphalt und die Pflastersteine	205

Literaturverzeichnis

- [1] United Nations Environment Programme, Hrsg., *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, 2020. Adresse: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020_Buildings_GSR_FULL_REPORT.pdf (aufgerufen am 29. 12. 2020).
- [2] E. W. Sanderson, M. Jaiteh, M. A. Levy, K. H. Redford, A. V. Wannebo und G. Woolmer, „The Human Footprint and the Last of the Wild,“ *BioScience*, Jg. 52, Nr. 10, S. 891, 2002, ISSN: 0006-3568.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment, Hrsg., *Ecosystems and Human Well-being: Opportunities and Challenges for Business and Industry: World Resources Institute, Washington, DC*. 2005. Adresse: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.353.aspx.pdf> (aufgerufen am 29. 12. 2020).
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011*, 2012.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020*, 2021.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013*, 2014.
- [7] *Was versteht man unter Klimaneutralität und wie kann diese bis 2050 erreicht werden?* 2019. Adresse: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190926STO62270/was-versteht-man-unter-klimaneutralitat> (aufgerufen am 21. 07. 2021).
- [8] W. McDonough und M. Braungart, *Cradle to cradle: remaking the way we make things*. Rodale Press, 2002, Bd. 40, ISBN: 0865475873. DOI: 10.5860/choice.40-0914.
- [9] World Business Council for Sustainable Development, Hrsg., *eco-efficiency: Learning Module*, 2006.
- [10] Deutsche Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, *ÖKOBAUDAT: Informationsportal Nachhaltiges Bauen*, 2020. (aufgerufen am 30. 12. 2020).
- [11] M. Nousiainen, H. Lindroos, P. Heino, M. Valta und J. Häkkinen, *Restorative Environment Design*, Kymenlaakso University of Applied Sciences, Hrsg., 2016.
- [12] B. Reed, „Shifting from sustainability to regeneration,“ *Building Research & Information*, Jg. 35, Nr. 6, S. 674–680, 2007, ISSN: 0961-3218. DOI: 10.1080/09613210701475753.

- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitung (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020*, 2021.
- [14] G. M. Teutsch, *Lexikon der Umweltethik*. Düsseldorf und Göttingen: Patmos-Verlag und Vandenhoeck & Ruprecht, 1985, ISBN: 3525501196.
- [15] Treffpunkt-umweltethik, *Anthropozentrisch*. Adresse: <http://www.treffpunkt-umweltethik.de/umweltethische-modelle/anthropozentrisch.htm> (aufgerufen am 17. 03. 2022).
- [16] Umweltbundesamt, Hrsg., *Der gute ökologische Zustand naturnaher terrestrischer Ökosysteme - ein Indikator für Biodiversität? Tagungsband zum Workshop in Dessau 19./20.09.2007*. 2007.
- [17] Umweltbundesamt, *Wirkungen auf Ökosysteme*. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme#einfuehrung> (aufgerufen am 18. 12. 2021).
- [18] P. Taalas, *State of the global climate 2020*, Ser. WMO. Genf: World Meteorological Organization (WMO), 2021, Bd. 12464, ISBN: 9789263112644. Adresse: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21880.
- [19] A. Schlutow, H.-D. Nagel und Y. Bouwer, *Critical Load Daten für die Berichterstattung 2015 – 2017 im Rahmen der Zusammenarbeit unter der Genfer Luftreinhaltekonvention (CLRTAP)*, Umweltbundesamt, Hrsg., 2018.
- [20] Europäische Union, *Verordnung (EU) 2021/1119 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 20128/1999 (Europäisches Klimagesetz): (EU) 2021/1119*.
- [21] Europäischen Kommission, *Europäischer Grüner Deal*, 2019. Adresse: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de#thematicareas (aufgerufen am 10. 08. 2021).
- [22] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019*.
- [23] Bundesministerium für Umwelt und Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hrsg., *Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*, 2019.
- [24] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hrsg., *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*, 2019.
- [25] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hrsg., *Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland*, 2019.
- [26] Climate Action, *Folgen des Klimawandels*, 19.07.2022. Adresse: https://ec.europa.eu/clima/climate-change/consequences-climate-change_de.
- [27] Treffpunkt-umweltethik, *Begründungsformen einer Umweltethik*, 2018. Adresse: <http://www.treffpunkt-umweltethik.de/modelle.htm> (aufgerufen am 18. 03. 2022).

- [28] A. Leist, „Ökologische Ethik II: Ökologische Gerechtigkeit: Global, intergenerationell und humanökologisch,“ in *Angewandte Ethik. Die Bereichsethiken und ihre theoretische Fundierung. Ein Handbuch*, S. 426–513.
- [29] Europäische Kommission, Hrsg., *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Mehr Ehrgeiz für das Klimaziel Europas bis 2030 - In eine klimaneutrale Zukunft zum Wohl der Menschen investieren*, Brüssel, 2020.
- [30] YouTube, *Richard David Precht Vortrag: Epochenumbruch & fehlende Verantwortung | 16.10.2019*. Adresse: https://www.youtube.com/watch?v=UQrmNRxJv6I&t=597s&ab_channel=PRECHTARCHIV (aufgerufen am 08. 11. 2021).
- [31] M. A. Martin, O. A. Sendra, A. Bastos, N. Bauer, C. Bertram, T. Blenckner, K. Bowen, P. M. Brando, T. B. Rudolph, M. Büchs, M. Bustamante, D. Chen, H. Cleugh, P. Dasgupta, F. Denton, J. F. Donges, F. K. Donkor, H. Duan, C. M. Duarte, K. L. Ebi, C. M. Edwards, A. Engel, E. Fisher, S. Fuss, J. Gaertner, A. Gettelman, C. A. Girardin, N. R. Golledge, J. F. Green, M. R. Grose, M. Hashizume, S. Hebden, H. Hepach, M. Hirota, H.-H. Hsu, S. Kojima, S. Lele, S. Lorek, H. K. Lotze, H. D. Matthews, D. McCauley, D. Mebratu, N. Mengis, R. H. Nolan, E. Pihl, S. Rahmstorf, A. Redman, C. E. Reid, J. Rockström, J. Rogelj, M. Saunio, L. Sayer, P. Schlosser, G. B. Sioen, J. H. Spangenberg, D. Stammer, T. N. Sterner, N. Stevens, K. Thonicke, H. Tian, R. Winkelmann und J. Woodcock, „Ten new insights in climate science 2021 – a horizon scan,“ *Global Sustainability*, S. 1–39, 2021. DOI: 10.1017/sus.2021.25.
- [32] United Nations, *Only 11 Years Left to Prevent Irreversible Damage from Climate Change, Speakers Warn during General Assembly High-Level Meeting | Meetings Coverage and Press Releases*. Adresse: <https://www.un.org/press/en/2019/ga12131.doc.htm> (aufgerufen am 08. 11. 2021).
- [33] U. Nations, *Population | United Nations*. Adresse: <https://www.un.org/en/global-issues/population> (aufgerufen am 06. 11. 2021).
- [34] United Nations, *Secretary-General's address at Columbia University: The State of the Planet | United Nations Secretary-General*. Adresse: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2020-12-02/address-columbia-university-the-state-of-the-planet> (aufgerufen am 08. 11. 2021).
- [35] United Nations, Hrsg., *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, 2019.
- [36] International Committee of the Red Cross, „Seven things you need to know about climate change and conflict,“ 2020. Adresse: <https://www.icrc.org/en/document/climate-change-and-conflict> (aufgerufen am 11. 08. 2021).
- [37] J. Podesta, *The climate crisis, migration, and refugees*, 2019. Adresse: <https://www.brookings.edu/research/the-climate-crisis-migration-and-refugees/> (aufgerufen am 08. 11. 2021).
- [38] D. Smith und J. Vivekananda, *A Climate of Conflict: The links between climate change, peace and war*, International Alert, Hrsg., 2007.

- [39] M. Braungart, W. McDonough und A. Bollinger, „Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 15, Nr. 13-14, S. 1337–1348, 2007, ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2006.08.003.
- [40] W. McDonough und M. Braungart, „Towards a sustaining architecture Towards a sustaining architecture for the 21st century: the promise of cradle-to-cradle design,“ 2003.
- [41] J. Birkeland und S. Knight-Lenihan, „Biodiversity offsetting and net positive design,“ *Journal of Urban Design*, Jg. 21, Nr. 1, S. 50–66, 2016, ISSN: 1357-4809. DOI: 10.1080/13574809.2015.1129891.
- [42] P. Mang und B. Reed, „Update Regenerative Development and Design 2nd edition,“ *Encyclopedia Sustainability Science & Technology*, 2017.
- [43] C. Du Plessis, „Towards a regenerative paradigm for the built environment,“ *Building Research & Information*, Jg. 40, Nr. 1, S. 7–22, 2012, ISSN: 0961-3218. DOI: 10.1080/09613218.2012.628548.
- [44] G. Roth, *Umwelt-Neurologie: Warum wir nicht tun, was wir tun sollten...und wie man das ändern kann*, Institut für Hirnforschung Universität Bremen, Hrsg., 2014.
- [45] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), www.bmub.bund.de, „Übereinkommen von Paris,“ 2015.
- [46] Bundesministerium für Umwelt und Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hrsg., *Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Ausgabe 2021*, 2021.
- [47] Bundesministerium der Finanzen, *Sofortprogramm für mehr Klimaschutz*, 2021. Adresse: <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Klimaschutz/klimaschutz-sofortprogramm.html> (aufgerufen am 16. 11. 2021).
- [48] P. Builtjes, E. Hendriks, M. Koenen, M. Schaap, S. Banzhaf, A. Kerschbaumer, T. Gauger, H.-D. Nagel, T. Scheuschner und A. Schlutow, *Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland: Zusammenfassender Abschlussbericht*, Umweltbundesamt, Hrsg., 2011.
- [49] World Health Organization, Hrsg., *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, Geneva: 2021.
- [50] United Nations Economic Commission for Europe, *Homepage | UNECE*. Adresse: <https://unece.org/> (aufgerufen am 20. 11. 2021).
- [51] Europäische Union, *RICHTLINIE (EU) 2016/ 2284 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES - vom 14. Dezember 2016 - über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/ 35/ EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/ 81/ EG*.
- [52] United Nations, *1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Longrange Transboundary Air Pollution, as amended on 4 May 2012*.
- [53] Umweltbundesamt, Hrsg., *Das Göteborg-Protokoll: Ein Meilenstein bei der Minderung grenzüberschreitender Luftverschmutzung*, 2019.
- [54] Bundeswirtschaftsministeriums und Bundesinnenministeriums, *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*.

- [55] Deutsche Umwelthilfe e.V., *Gebäudeenergiegesetz im Bundeskabinett: Angekündigtes Ölheizungsverbot entlarvt sich als Luftnummer*. Adresse: <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/gebäudeenergiegesetz-im-bundeskabinett-angekündigtes-ölheizungsverbot-entlarvt-sich-als-luftnummer/> (aufgerufen am 16. 11. 2021).
- [56] Verbraucherzentrale Bundesverband, *Gebäudeenergiegesetz ist kein großer Wurf*. Adresse: <https://www.vzbv.de/pressemitteilungen/gebäudeenergiegesetz-ist-kein-grosser-wurf> (aufgerufen am 12. 11. 2021).
- [57] J. Birkeland, *Positive development: from vicious circles to virtuous cycles through built environment design*. 2008.
- [58] Ellen MacArthur Foundation, Hrsg., *Circular Economy - The Ellen MacArthur Foundation*. Adresse: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/> (aufgerufen am 23. 07. 2021).
- [59] K. Raworth, „A Safe and Just Space for Humanity: Can we live within the doughnut?“ *Oxfam Discussion Papers*, 2012.
- [60] Architects for Future Deutschland e.V., *Willkommen bei Architects for Future*. Adresse: <https://www.architects4future.de/> (aufgerufen am 23. 07. 2021).
- [61] A. Braune, C. Lemaitre, F. Jansen und U. von Gemmingen, *Klima Positiv: Jetzt! Wie jedes Gebäude einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann*, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V., Hrsg., 2020.
- [62] Europäische Kommission, Hrsg., *New European Bauhaus (NEB)*, 2020.
- [63] Cradle to Cradle Certified, *Cradle to Cradle Certified Version 4.0 - Get Certified - Cradle to Cradle Products Innovation Institute*. Adresse: <https://www.c2ccertified.org/get-certified/cradle-to-cradle-certified-version-4> (aufgerufen am 24. 07. 2021).
- [64] *Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen: Bauen mit einem positiven ökologischen Fußabdruck*. Adresse: <https://www.bgu.tum.de/enpb/startseite/> (aufgerufen am 24. 07. 2021).
- [65] Cradle to Cradle Baustammtisch München und der Architects for Future Ortsgruppe München, Hrsg., *München 2020*. Adresse: <https://muenchen2020.org/> (aufgerufen am 24. 07. 2021).
- [66] v3sta, *Ökologisch positive Gebäude*. Adresse: <https://www.v3sta.de/> (aufgerufen am 24. 07. 2021).
- [67] Organisation for Economic Cooperation and Development, Hrsg., *Eco-Efficiency*. Adresse: https://www.oecd-ilibrary.org/environment/eco-efficiency_9789264040304-en (aufgerufen am 26. 07. 2021).
- [68] Drees & Sommer SE, Hrsg., *Cradle to Cradle - Drees & Sommer*. Adresse: <https://www.dreso.com/de/dreso/nachhaltig/cradle-to-cradle> (aufgerufen am 26. 07. 2021).
- [69] M. Pedersen Zari und S. Jenkin, *Rethinking our built environments: Towards a sustainable future*. Ministry for the Environment, 2009.
- [70] M. Braun, E. Haselsteiner, D. Apró, D. Kopeva, E. Luca, K. L. Pulkkinen und B. Vula Rizvanolli, „RESTORE, Sustainability, Restorative to Regenerative - Sustainability, Restorative to Regenerative: An exploration in progressing a paradigm shift in built environment thinking, from sustainability to restorative sustainability and on to regenerative sustainability,“ 2018.

- [71] E. Fromm, *Die Seele des Menschen: Ihre Fähigkeit zum Guten und zum Bösen*, Neuausgabe, Ser. dtv Sachbuch. München: dtv, 2016, ISBN: 3423348801.
- [72] Biomimicry Institute, *What Is Biomimicry? – Biomimicry Institute*. Adresse: <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/> (aufgerufen am 26. 07. 2021).
- [73] United Nations, Hrsg., *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*, 1987.
- [74] Bundesregierung, *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV)*, 1977.
- [75] Bundesinstituts für Bau-, Stadt und Raumforschung, *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)*.
- [76] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V., Hrsg., *DGNB Kriterium ENV1.1 Ökobilanz*, 2020.
- [77] C. Du Plessis und P. Brandon, „An ecological worldview as basis for a regenerative sustainability paradigm for the built environment,“ *Journal of Cleaner Production*, 2015, ISSN: 09596526.
- [78] R. J. Cole, „Transitioning from green to regenerative design,“ *Building Research & Information*, Jg. 40, Nr. 1, S. 39–53, 2012, ISSN: 0961-3218. DOI: 10.1080/09613218.2011.610608.
- [79] H. M. Harter, *Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Wohngebäudebestände auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle*. mediaTUM, 2021. Adresse: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1610979>.
- [80] C. Hoxie, R. Berkebile und J. A. Todd, „Stimulating regenerative development through community dialogue,“ *Building Research & Information*, Jg. 40, Nr. 1, S. 65–80, 2012, ISSN: 0961-3218. DOI: 10.1080/09613218.2011.628546.
- [81] Bauhaus der Erde gGmbH, Hrsg., *Bauhaus der Erde*, 2021. Adresse: <https://www.bauhausdererde.org/about>.
- [82] K. Humberg, *Bauhaus der Erde FAQ*, www.bauhausdererde.org, Hrsg., 2021.
- [83] International Living Future Institute, Hrsg., *Living Building Challenge 4.0: A Visionary Path to a Regenerative Future*, 2019.
- [84] S. Attia, *Regenerative and Positive Impact Architecture*. Cham: Springer International Publishing, 2018, ISBN: 978-3-319-66717-1. DOI: 10.1007/978-3-319-66718-8.
- [85] vbw Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V., Hrsg., *Constructing Our Future: Planen. Bauen. Leben. Arbeiten. Handlungsempfehlungen des Zukunfrats der Bayerischen Wirtschaft*, 2021. Adresse: www.vbw-bayern.de.
- [86] Wirtschaft und Energie, Bundesministerium für, *Erneuerbare Energien*. Adresse: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> (aufgerufen am 07. 10. 2021).
- [87] B. Lenz, J. Schreiber und T. Stark, *Nachhaltige Gebäudetechnik: Grundlagen, Systeme, Konzepte*, 1. Aufl., Ser. Edition Detail. München: Inst. für Int. Architektur-Dokumentation Ed. Detail, 2010, ISBN: 978-3-920034-34-8.
- [88] BauNetz, *Plusenergiehaus | Nachhaltig Bauen | Glossar | Baunetz_Wissen*. Adresse: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/p/plusenergiehaus-812834> (aufgerufen am 03. 11. 2021).

- [89] BdeW, *Entwicklung des personenbezogenen Wassergebrauchs*. Adresse: <https://www.bdeW.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-des-personenbezogenen-wassergebrauchs/> (aufgerufen am 04. 11. 2021).
- [90] F. Christiane, *Zur Rolle der Ressource Wasser in Konflikten APuZ*, Bundeszentrale für politische Bildung, Hrsg., 2006. Adresse: <https://www.bpb.de/apuz/29703/zur-rolle-der-ressource-wasser-in-konflikten> (aufgerufen am 04. 11. 2021).
- [91] D. Welle, *Die wachsende Bedrohung durch Wasserkonflikte | DW | 19.03.2020*. Adresse: <https://www.dw.com/de/die-wachsende-bedrohung-durch-wasserkonflikte/a-52745441> (aufgerufen am 04. 11. 2021).
- [92] T. Aufmkolk, *Wassernot: Konfliktstoff Wasser*, 2021. Adresse: <https://www.planet-wissen.de/natur/umwelt/wassernot/pwiekonfliktstoffwasser100.html> (aufgerufen am 04. 11. 2021).
- [93] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., *Naturnaher Umgang mit Regenwasser – Verdunstung und Versickerung statt Ableitung*, 2016.
- [94] Internationaler Verein für zukunftsfähiges Bauen und Wohnen - natureplus e.V., *natureplus Produkte*. Adresse: <https://www.natureplus-database.org/produkte.php> (aufgerufen am 05. 11. 2021).
- [95] International WELL Building Institute, *WELL Certified | International WELL Building Institute | IWBI*. Adresse: <https://www.wellcertified.com/> (aufgerufen am 05. 11. 2021).
- [96] K. Theilig, M. Vollmer und W. Lang, „Identification and life cycle based allocation of building emissions based on a systematic literature review,“ *Journal of Physics: Conference Series*, Jg. 2042, Nr. 1, S. 012 177, 2021, ISSN: 1742-6588. DOI: 10.1088/1742-6596/2042/1/012177.
- [97] F. Banihashemi, S. Erlwein, H. Harter, C. Meier-Dotzler und T. Zölch, *Grüne Stadt der Zukunft: Grüne und graue Maßnahmen für die Siedlungsentwicklung - Klimaschutz und Klimaanpassung in wachsenden Städten*, Technische Universität München, Hrsg., 2021.
- [98] A. Bauer, S. Linke, S. Erlwein und C. Meier-Dotzler, *Grüne Stadt der Zukunft: Klimaresiliente Quartiere in einer wachsenden Stadt*, Technische Universität München, Hrsg., 2021.
- [99] F. Well und F. Ludwig, „Blue–green architecture: A case study analysis considering the synergetic effects of water and vegetation,“ *Frontiers of Architectural Research*, Jg. 9, Nr. 1, S. 191–202, 2020, ISSN: 20952635. DOI: 10.1016/j.foar.2019.11.001.
- [100] H. Kopnina, „Green-washing or best case practices? Using circular economy and Cradle to Cradle case studies in business education,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 219, S. 613–621, 2019, ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.005.
- [101] E. Music, *Cradle-to-Cradle: An interdisciplinary systematic literature review*, Johannes Kepler Universität Linz, Hrsg., 2021.
- [102] P. Llorach-Massana, R. Farreny und J. Oliver-Solà, „Are Cradle to Cradle certified products environmentally preferable? Analysis from an LCA approach,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 93, S. 243–250, 2015, ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.01.032.
- [103] R. Taghizadegan, *Cradle-to-Cradle - die nächste Sau, die man durch das globale Dorf treibt?* Magazin für Zukunftskompetenz, Hrsg., 2010.
- [104] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Baugesetzbuch: (BauGB)*, 2020.

- [105] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke - Baunutzungsverordnung: (BauNVO)*, 2017.
- [106] Bundestag, *Gesetz zur Änderung des Baugesetzbuchs und zur Neuregelung des Rechts der Raumordnung (Bau- und Raumordnungsgesetz 1998 - BauROG): BauROG*, 1997.
- [107] Deutscher Bundestag, „Ausgleichsverpflichtungen nach dem Baugesetzbuch und dem Bundesnaturschutzgesetz,“ 2018.
- [108] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Bundesnaturschutzgesetz -BNatSchG, Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege: BNatSchG*, 2009.
- [109] Elke Bruns, *Bewertungs- und Bilanzierungsmethoden in der Eingriffsregelung: Analyse und Systematisierung von Verfahren und Vorgehensweisen des Bundes und der Länder*. 2007.
- [110] Bayerische KulturLandStiftung, *Ökokonten und Ökopunkte*. Adresse: <http://www.bayerischekulturlandstiftung.de/oekokonten-und-oekopunkte> (aufgerufen am 01.03.2021).
- [111] Europäische Union, *Richtlinie 2004/35/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 über Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden*.
- [112] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., *Arbeitshilfe zur Biotopwertliste (BayKompV): Verbale Kurzbeschreibung*, 2014.
- [113] Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern für Bau und Verkehr, Hrsg., *Biotopwertliste zur Anwendung der Bayerischen Kompensationsverordnung (BayKompV)*, 2014.
- [114] Bundesamt für Naturschutz, *Rote Listen gefährdeter Biotoptypen, Tier- und Pflanzenarten sowie der Pflanzengesellschaften*, 2021. Adresse: <https://www.bfn.de/themen/rote-liste.html> (aufgerufen am 24.02.2021).
- [115] Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Biotopkartierung*, 2020. Adresse: <https://www.lfu.bayern.de/natur/biotopkartierung/index.htm> (aufgerufen am 04.03.2021).
- [116] Lang & Walentowski 2006, *Handbuch der FFH-Lebensraumtypen Bayern*, Bayerisches Landesamt für Umwelt und Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Hrsg., 2010.
- [117] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., *Entwicklungszeiträume von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen: Arbeitshilfen zur Entwicklung und Erhaltung von Ökoflächen*, Augsburg, 2007.
- [118] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Hrsg., *Kartierungs- und Bewertungsverfahren Gewässerstruktur: Erläuterungsbericht, Kartier- und Bewertungsanleitung*, 2002.
- [119] H. Sukopp, „Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluß des Menschen,“ Jg. 1972, Nr. Ber. ü. Landwirt. 50, S. 112–139,
- [120] S. Klotz und I. Kühn, „Indikatoren des anthropogenen Einflusses auf die Vegetation,“ *BioFlor—Eine Datenbank zu biologisch-ökologischen Merkmalen der Gefäßpflanzen in Deutschland*, S. 241–246, 2002.
- [121] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Bestimmungsschlüssel für Flächen nach § 30 BNatSchG / Art. 23 BayNatSchG (§ 30-Schlüssel),“ 2020.
- [122] Bayerische Staatsregierung, *Verordnung über die Kompensation von Eingriffen in Natur und Landschaft (Bayerische Kompensationsverordnung – BayKompV): (BayKompV)*, 2013.

- [123] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Hrsg., *Naturschutzrechtliche Kompensation in Bayern: Ziele und Umsetzung der Bayerischen Kompensationsverordnung*, 2015.
- [124] J. Rabenschlag, N. Schoof, J. Schumacher und A. Reif, „Evaluation der Umsetzung baurechtlicher Ausgleichsmaßnahmen: Am Fallbeispiel Schönberg bei Freiburg,“ Nr. Naturschutz und Landschaftsplanung, 2019.
- [125] S. Ecker und U. Pröbstl-Haider, „Erfolgskontrollen von Ausgleichsflächen im Rahmen der Bauleitplanung in Bayern: Analyse am Beispiel des Landkreises Passau in Niederbayern,“ Nr. 48 (5), 161-167, 2016.
- [126] Bundesamt für Naturschutz und Deutscher Rat für Landespflege, Hrsg., *30 Jahre naturschutzrechtliche Eingriffsregelung: Bilanz und Ausblick*, 2007.
- [127] M. Schmidt, B. Rexmann, S. Tischew und H. Teubert, „Kompensationsdefizite bei Straßenbauvorhaben und Schlussfolgerungen für die Eingriffsregelung: Ursachen und Konsequenzen für die Praxis – Ergebnisse eines F+E-Projekts,“ Nr. Naturschutz und Landschaftsplanung 36, (1), 2004.
- [128] S. Tischew, B. Rexmann, M. Schmidt, H. Teubert und B. Krug, *Erfolgskontrollen von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen an der Bundesautobahn A14 zwischen Halle und Magdeburg*, Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Hrsg., 2004.
- [129] B. Jessel, R. Rudolf, U. Feickert und U. Wellhöfer, „Nachkontrollen in der Eingriffsregelung: Erfahrungen aus 4 Jahren Kontrollpraxis in Brandenburg,“ *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg*, Nr. 12, S. 144–149, 2003.
- [130] Bayerischer Gemeindetag & Bayerischer Städtetag, Hrsg., *Handlungsempfehlungen für ein Ökokonto: Ein Vorsorgeinstrument für die Eingriffsregelung in der Bauleitplanung*. 2000.
- [131] A. Ruff, B. Jeuther, E. Schubert und R. Hettrich, *Evaluation der Ökokonto-Verordnung Baden-Württemberg*, LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Hrsg., 2018.
- [132] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Bundeskompensationsverordnung - BKompV, Verordnung über die Vermeidung und die Kompensation von Eingriffen in Natur und Landschaft im Zuständigkeitsbereich der Bundesverwaltung: BKompV*, 2020.
- [133] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Bundeskompensationsverordnung (BKompV) - Hintergrund*. Adresse: <https://www.bmu.de/themen/naturschutz-artenvielfalt/naturschutz-biologische-vielfalt/allgemeines/-/-strategien/bundeskompensationsverordnung-bkompv-hintergrund> (aufgerufen am 25. 02. 2021).
- [134] Des Rates der europäischen Gemeinschaft, *Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen*.
- [135] Europäische Union, *Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)*.
- [136] Europäische Union, *Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinie 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EH und 2006/32/EG*.
- [137] World Green Building Council, Hrsg., *The Business Case for Green Building: A review of the Costs and Benefits for Developers, Investors and Occupants*, 2013.

- [138] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V., *DGNB e.V. – Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*, 2021. Adresse: <https://www.dgnb.de/de/index.php> (aufgerufen am 27. 11. 2021).
- [139] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, *Nachhaltiges Bauen auf dem Vormarsch: DGNB trotz Corona mit neuen Erfolgszahlen*, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Hrsg. Adresse: <https://www.dgnb.de/de/aktuell/pressemitteilungen/2021/dgnb-update> (aufgerufen am 06. 11. 2021).
- [140] K. G. Jensen, K. S. Poulsgaard, L. Lind, C. Ø. Christensen, O. Skjelmoose, S. J. Carruth, K. K. Jensen, I. O. Canera, J. Manbodh, H. Birgisdottir und R. K. Zimmermann, *Guide to Sustainable Building Certifications*, SBi and GXN, Hrsg., 2018.
- [141] Active House Alliance, *The Active House Specifications 3rd Edition*, 2020.
- [142] BREEAM - Sustainability Assessment Method, *Technical Standards BREEAM - Sustainability Assessment Method*, 2016. Adresse: <https://www.breeam.com/discover/technical-standards/> (aufgerufen am 27. 11. 2021).
- [143] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V., Hrsg., *DGNB System: Kriterienkatalog Gebäude Neubau*, 2018.
- [144] Green Star Building Council Asutralia, *Green Star Rating System | Green Building Council of Australia*, 2021. Adresse: <https://new.gbca.org.au/green-star/rating-system/> (aufgerufen am 27. 11. 2021).
- [145] *be HQE: Join the Movement for Performance and Quality of Life*, 2021.
- [146] U.S. Green Building Council, Hrsg., *LEED v4 for Building Design and Construction: Updated July 25, 2019*, 2019.
- [147] International Living Future Institute, Hrsg., *Living Building Challenge 4.0: A visionary Path to a Regenerative Future*, 2019.
- [148] J. Reap, F. Roman, S. Duncan und B. Bras, „A survey of unresolved problems in life cycle assessment,“ *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 13, Nr. 5, S. 374–388, 2008, ISSN: 0948-3349. DOI: 10.1007/s11367-008-0009-9.
- [149] United Nations Environment Programme, Hrsg., *Evaluation of environmental impacts in life cycle assessment: Meeting report, Brussels, 29 - 30 November 1998, and Brighton, 25 - 26 May 2000*, Paris, 2003.
- [150] A. Hofbauer, *Systematische Analyse und Anwendung von potenziellen Methoden zur Ermittlung der direkten Umweltwirkungen von Gebäuden*, mediaTUM, Hrsg., 2019.
- [151] M. Wackernagel, W. Rees und P. Testemale, *Unser ökologischer Fußabdruck: Wie der Mensch Einfluß auf die Umwelt nimmt*. Basel: Birkhäuser, 1997, ISBN: 3-7643-5660-X.
- [152] M. Narodoslowsky und C. Krotscheck, „The sustainable process index (SPI): evaluating processes according to environmental compatibility,“ *Journal of Hazardous Materials*, Jg. 41, Nr. 2-3, S. 383–397, 1995, ISSN: 03043894. DOI: 10.1016/0304-3894(94)00114-V.
- [153] Bundesamt für Umwelt, Hrsg., *Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006*, Bern, 2009.

- [154] S. Bastianoni, A. Galli, V. Niccolucci und R. M. Pulselli, „The ecological footprint of building construction,“ in *The Sustainable City IV: Urban Regeneration and Sustainability*, U. Mander, C. A. Brebbia und E. Tiezzi, Hrsg., Southampton, UK: WIT Press, 6282006, S. 345–356, ISBN: 1845640403. DOI: 10.2495/SC060331.
- [155] J. Solís-Guzmán, M. Marrero und A. Ramírez-de-Arellano, „Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain),“ *Ecological Indicators*, Jg. 25, S. 239–249, 2013, ISSN: 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.10.008.
- [156] M. Liu, B. Zhang, J. Ren, H. Gu und J. Yuan, „Sustainability Evaluation of the Ecological Footprint of Rural Residential Houses with Difference Martials,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jg. 394, S. 032 040, 2018, ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/394/3/032040.
- [157] J. Teng und X. Wu, „Eco-footprint-based life-cycle eco-efficiency assessment of building projects,“ *Ecological Indicators*, Jg. 39, S. 160–168, 2014, ISSN: 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.12.018.
- [158] P. Y. Lim, K. Yahya, E. Aminudin, R. Zakaria, Z. Haron, R. Mohamad Zin und A. A. H. Redzuan, „Carbon footprint of construction using industrialised building system,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jg. 271, S. 012 107, 2017, ISSN: 1757-8981. DOI: 10.1088/1757-899X/271/1/012107.
- [159] M. Airaksinen und P. Matilainen, „A Carbon Footprint of an Office Building,“ *Energies*, Jg. 4, Nr. 8, S. 1197–1210, 2011. DOI: 10.3390/en4081197.
- [160] B. Rugani, D. Maia de Souza, B. P. Weidema, J. Bare, B. Bakshi, B. Grann, J. M. Johnston, A. L. R. Pavan, X. Liu, A. Laurent und F. Verones, „Towards integrating the ecosystem services cascade framework within the Life Cycle Assessment (LCA) cause-effect methodology,“ *The Science of the total environment*, Jg. 690, S. 1284–1298, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.023.
- [161] E. M. Alejandro, P. M. van Bodegom und J. B. Guinée, „Towards an optimal coverage of ecosystem services in LCA,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 231, S. 714–722, 2019, ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.284.
- [162] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum und S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing, 2018, ISBN: 978-3-319-56474-6. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- [163] R. Chaplin-Kramer, S. Sim, P. Hamel, B. Bryant, R. Noe, C. Mueller, G. Rigarlford, M. Kulak, V. Kowal, R. Sharp, J. Clavreul, E. Price, S. Polasky, M. Ruckelshaus und G. Daily, „Life cycle assessment needs predictive spatial modelling for biodiversity and ecosystem services,“ *Nature communications*, Jg. 8, S. 15 065, 2017. DOI: 10.1038/ncomms15065.
- [164] A. Bruel, N. Troussier, B. Guillaume und N. Sirina, „Considering Ecosystem Services in Life Cycle Assessment to Evaluate Environmental Externalities,“ *Procedia CIRP*, Jg. 48, S. 382–387, 2016, ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.143.
- [165] C. P. VanderWilde und J. P. Newell, „Ecosystem services and life cycle assessment: A bibliometric review,“ *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 169, S. 105 461, 2021, ISSN: 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105461.
- [166] J. C. Bare, P. Hofstetter, D. W. Pennington und H. A. Udo de Haes, „Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits,“ *Int. J. LCA*, Nr. 5, 2000. DOI: 10.1007/BF02978665.

- [167] EQUA, *IDA ICE - Simulation Software*, 2020. Adresse: <https://www.equa.se/de/ida-ice>.
- [168] P. Schneider-Marin und W. Lang, „Environmental costs of buildings: monetary valuation of ecological indicators for the building industry,“ *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 25, Nr. 9, S. 1637–1659, 2020, ISSN: 0948-3349. DOI: 10.1007/s11367-020-01784-y.
- [169] P. Schönauer und M. Vollmer, „Data Deficits in the Life Cycle Assessment of Buildings,“ in *9th Colloquium of the MSE*, S. 64. Adresse: https://www.mep.tum.de/fileadmin/w00bvc/mep/Veranstaltungen/Kolloquien/Kolloquium_2019/MSE_2019_BoA.pdf.
- [170] United Nations, Hrsg., *Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013*, 2014.
- [171] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Hrsg., *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*, 2017.
- [172] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Kosten im Bauwesen DIN 276-2018*, 2018.
- [173] Duden, *Ökosystem*. Adresse: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Oekosystem> (aufgerufen am 18. 12. 2021).
- [174] S. Bundesamt, *Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Fachserie 3 Reihe 5.1*, 2020.
- [175] Umweltbundesamt, Hrsg., *Daten zur Umwelt - Umweltmonitor 2020*, 2020.
- [176] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Hrsg., *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2020*, 2020.
- [177] United Nations Economic Commission for Europe, Hrsg., *The UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention)*. Adresse: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/links/institutions/the-unece-convention-on-long> (aufgerufen am 19. 12. 2021).
- [178] CLRTAP, 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. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, 2015. Adresse: www.icpmapping.org (aufgerufen am 18. 12. 2021).
- [179] H.-D. Nagel, *4. Critical Loads & Levels: naturwissenschaftliche Bestandteile eines Indikatorsystems für dauerhafte-umweltgerechte Entwicklungen*. Adresse: <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/8601/8/Kap4.pdf>.
- [180] Umweltbundesamt, *Manual for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels*. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/en/manual-for-modelling-mapping-critical-loads-levels> (aufgerufen am 19. 12. 2021).
- [181] J. Nilsson und P. Greenfelt, „Critical loads for sulphur and nitrogen: Report from a Workshop held at Skokloster, Sweden, 19 - 24 March, 1988,“ in, Bd. 1988,97.
- [182] CLRTAP, Hrsg., *Mapping critical loads for ecosystems, Chapter V of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*; 2017. Adresse: www.icpmapping.org (aufgerufen am 18. 12. 2021).

- [183] M. Schaap, C. Hendriks, R. Kraneneburg, J. Kuenen, A. Segers, A. Schlutow, H.-D. Nagel, A. Ritter und S. Benzhaf, *PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland*, Umweltbundesamt, Hrsg., 2018.
- [184] M. Schaap, C. Hendriks, R. Kranenburg und J. Kuenen, A. Segers, A. Schlutow, H.-D. Nagel, A. Ritter, S. Banzhaf, *PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland*, Umweltbundesamt, Hrsg., 2018.
- [185] T. Riedel, W. Stürmer, P. Henning, K. Dunger und A. Bolte, *Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsenke: Kohlenstoffinventur 2017*, 2017.
- [186] Thünen-Institut, Hrsg., *Bundeswaldinventur (Treibhausgasinventar 2017)*. Adresse: <https://bwi.info/?inv=THG2017> (aufgerufen am 21. 12. 2021).
- [187] Bundesamt für Naturschutz, Hrsg., *Grünland-Report: Alles im Grünen Bereich?* 2014.
- [188] I. Alonso, K. Weston, R. Gregg und M. Morecroft, *Carbon storage by habitat: Review of the evidence of the impacts of management decisions and condition of carbon stores and sources*, 2012.
- [189] P. Frühwirth, *Grünland schafft Luft zum Leben*, Landwirtschaftskammer Oberösterreich, Hrsg., 2020.
- [190] M. Sozanska-Stanton, P. D. Carey, G. H. Griffiths, I. N. Vogiatzakis, J. Treweek, B. Butcher, M. B. Charlton, C. Keenleyside, N. W. Arnell, G. Tucker und P. Smith, „Balancing conservation and climate change – a methodology using existing data demonstrated for twelve UK priority habitats,“ *Journal for Nature Conservation*, Jg. 30, S. 76–89, 2016, ISSN: 16171381. DOI: 10.1016/j.jnc.2016.01.005.
- [191] R. Gregg, J. L. Elias, I. Alonso, I. E. Crosher, P. Muto und M. D. Morecroft, *Carbon storage and sequestration by habitat: a review of the evidence (second edition)*, Natural England, Hrsg., 2021.
- [192] M. Drösler, *Trace Gas Exchange and Climatic Relevance of Bog Ecosystems, Southern Germany*. 2005.
- [193] M. Drösler, *Was haben Moore mit dem Klima zu tun?* Laufener Spezialbeiträge, Hrsg., 2009.
- [194] J. J. Cole, Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg und J. Melack, „Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget,“ *Ecosystems*, Jg. 10, Nr. 1, S. 172–185, 2007, ISSN: 1432-9840. DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8.
- [195] R. Marcé, B. Obrador, L. Gómez-Gener, N. Catalán, M. Koschorreck, M. I. Arce, G. Singer und D. von Schiller, „Emissions from dry inland waters are a blind spot in the global carbon cycle,“ *Earth-Science Reviews*, Jg. 188, S. 240–248, 2019, ISSN: 00128252. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.11.012.
- [196] P. A. Raymond, J. Hartmann, R. Lauerwald, S. Sobek, C. McDonald, M. Hoover, D. Butman, R. Striegl, E. Mayorga, C. Humborg, P. Kortelainen, H. Dürr, M. Meybeck, P. Ciais und P. Guth, „Global carbon dioxide emissions from inland waters,“ *Nature*, Jg. 503, Nr. 7476, S. 355–359, 2013. DOI: 10.1038/nature12760.
- [197] L. J. Tranvik, J. J. Cole und Y. T. Prairie, „The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle,“ *Limnology and Oceanography Letters*, Jg. 3, Nr. 3, S. 41–48, 2018, ISSN: 2378-2242. DOI: 10.1002/lol2.10068.

- [198] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., *Critical Loads stickstoffempfindlicher Lebensraumtypen in Bayern*, 2021.
- [199] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, Hrsg., *Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Stickstoffeinträgen*, 2012.
- [200] A. Schlutow, Y. Bouwer, T. Scheuschner, H.-D. Nagel, *Ermittlung und Bewertung der Einträge von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffe in terrestrische Ökosysteme (PINET12) - Teilbericht II. Critical Load, Exceedance und Belastungsbewertung*, 2017.
- [201] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg., *Produktcenter*. Adresse: <https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/OpenSearch.do?search=45E74823-606B-4BB7-866E-5E84DA81301F&type=/Query/OpenSearch.do> (aufgerufen am 04.01.2022).
- [202] *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5., verb. und erw. Aufl. Stuttgart und Hannover: Schweizerbart i. Komm und Bundesanst. für Geowiss. und Rohstoffe, 2005, ISBN: 3510959205.
- [203] W. de Vries, J.-P. Hettelingh und M. Posch, *Critical Loads and Dynamic Risk Assessments*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, Bd. 25, ISBN: 978-94-017-9507-4. DOI: 10.1007/978-94-017-9508-1.
- [204] Leiden University, *CML-IA Characterisation Factors*, 2016. Adresse: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>.
- [205] D. J. Eatough, F. M. Caka und R. J. Farber, „The Conversion of SO₂ to Sulfate in the Atmosphere,“ *Israel Journal of Chemistry*, Nr. Vol. 34, S. 301–314, 1991.
- [206] Umweltbundesamt, Hrsg., *Hintergrunddatensatz der Stickstoffdeposition Ergebnisse und Daten des PINETI-3-Projekts*, 2019.
- [207] Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH, Hrsg., *Deutscher Critical Load Datensatz*. Adresse: <https://www.oekodata.com/ablage/16-deutscher-critical-load-datensatz> (aufgerufen am 09.01.2022).
- [208] D. Kierdorf, *Entwicklung eines klimaneutralen Heiz- und Kühlkonzepts unter Anwendung von Optimierungsverfahren in der Gebäudesimulation*. mediaTUM, 2019.
- [209] M. Wetter und E. Polak, „A convergent optimization method using pattern search algorithms with adaptive precision simulation,“ *Building Serv. Eng. Res. Technol.* 25, Nr. 4, S. 327–338, 2004.
- [210] T. Arens, F. Hettlich, C. Karpfinger, U. Kockelkorn, K. Lichtenegger und H. Stachel, „Differenzialrechnung – Veränderungen kalkulieren,“ in *Mathematik*, T. Arens, F. Hettlich, C. Karpfinger, U. Kockelkorn, K. Lichtenegger und H. Stachel, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 315–372, ISBN: 978-3-662-56740-1. DOI: 10.1007/978-3-662-56741-8₁₀.
- [211] J. Kennedy und R. Eberhart, „Particle Swarm Optimization: Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Nr. 4, S. 1942–1948,“ 1995.
- [212] R. Hooke und T. A. Jeeves, „Direct Search - Solution of Numerical and Statistical Problems,“ *Journal of the ACM*, Jg. 8, Nr. 2, S. 212–229, 1961.
- [213] A. Thevenot, *Particle Swarm Optimization (PSO) Visually Explained*. Adresse: <https://towardsdatascience.com/particle-swarm-optimization-visually-explained-46289eeb2e14> (aufgerufen am 07.01.2022).
- [214] D. Schröder, *Intelligente Verfahren: Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme*. Berlin und Heidelberg: Springer, 2010, ISBN: 9783642113970.

- [215] M. Vollmer, H. Harter, S.-M. Patricia und W. Lang, *Ferd. Tausendpfund - Lebenszyklusanalyse und Gebäudemonitoring*, Bayerischer Bauindustrieverband e.V., Hrsg., 2019.
- [216] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Luftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019*, 2021.
- [217] Ausschuss für Arbeitsstätten, *Technische Regeln für Arbeitsstätten, Raumtemperatur, ASR A3.5*.
- [218] Ausschuss für Arbeitsstätten, *Technische Regeln für Arbeitsstätten, Lüftung, ASR A3.6*.
- [219] H. Austria, *Katalog bauphysikalisch und ökologisch geprüfter Holzbauteile*. Adresse: <https://www.dataholz.eu/> (aufgerufen am 09. 05. 2020).
- [220] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Hrsg., *Entwicklung der Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau : 10-Jahre-Rückblick bis heute*. Adresse: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-beheizungsstruktur-wohnungsneubau/> (aufgerufen am 02. 03. 2022).
- [221] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Hrsg., *Starkes Wachstum im Wärmepumpenmarkt*, 2022.
- [222] Google, *Google Maps, Regensburg, Bayern, Deutschland*. Adresse: <https://www.google.de/maps/@49.015988,12.1463398,15.54z> (aufgerufen am 11. 03. 2022).
- [223] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen: RStO 12*, Köln.
- [224] Google, *Google Maps, Regensburg, Bayern, Deutschland*, . Adresse: <https://www.google.de/maps/@49.0150538,12.1489534,16z> (aufgerufen am 12. 03. 2022).
- [225] J. Yang, Q. Yu und P. Gong, „Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago,“ *Atmospheric Environment*, Jg. 42, Nr. 31, S. 7266–7273, 2008, ISSN: 13522310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.003.
- [226] S. Cascone, F. Catania, A. Gagliano und G. Sciuto, „A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings,“ *Building and Environment*, Jg. 136, S. 227–239, 2018, ISSN: 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.03.052.
- [227] K. L. Getter, D. B. Rowe, G. P. Robertson, B. M. Cregg und J. A. Andresen, „Carbon sequestration potential of extensive green roofs,“ *Environmental science & technology*, Jg. 43, Nr. 19, S. 7564–7570, 2009, ISSN: 0013-936X. DOI: 10.1021/es901539x.
- [228] A. George, *The Potential Carbon Offset Represented by a Green Roof*, University of Virginia, Hrsg., 2012.
- [229] S. Herfort, S. Tschuikowa und A. Ibanez, *CO₂-Bindungsvermögen der für die Bauwerksbegrünung typischen pflanzen*, Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte, Hrsg., 2012.
- [230] J. Heusinger und S. Weber, „Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements,“ *The Science of the total environment*, Jg. 607-608, S. 623–632, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.052.

- [231] T. Kuronuma und H. Watanabe, „Relevance of Carbon Sequestration to the Physiological and Morphological Traits of Several Green Roof Plants during the First Year after Construction,“ *American Journal of Plant Sciences*, Jg. 08, Nr. 01, S. 14–27, 2017, ISSN: 2158-2742. DOI: 10.4236/ajps.2017.81002.
- [232] T. Kuronuma, H. Watanabe, T. Ishihara, D. Kou, K. Touda, M. Ando und S. Shindo, „CO₂ Payoff of Extensive Green Roofs with Different Vegetation Species,“ *Sustainability*, Jg. 10, Nr. 7, S. 2256, 2018. DOI: 10.3390/su10072256.
- [233] J. Hirsch, J. Lafuente, P. Taltavull de La Paz, M. Spanner, P. Geiger, M. Haran, S. Mcgreal, P. Davis, R. Pérez Sánchez, F. J. Tárraga, A. M. Martínez Llorens und D. Brounen, *Report 1. Stranding Risk and Carbon. Science-based decarbonising of the EU commercial real estate sector*, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.28625.99681.
- [234] N. Thomas, *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: Daten für die Jahre von 1990 bis 2020*, AG Energiebilanzen e.V., Hrsg., 2021.
- [235] R. Hübner und H. Hoffmann, *Auswirkungen nachwachsender Rohstoffe zur Energieerzeugung auf Natur und Landschaft in Bayern*, Technische Universität München, Hrsg., 2009.
- [236] J.-F. Bastin, Y. Finegold, C. Garcia, D. Mollicone, M. Rezende, D. Routh, C. M. Zohner und T. W. Crowther, „The global tree restoration potential,“ *Science (New York, N.Y.)*, Jg. 365, Nr. 6448, S. 76–79, 2019.
- [237] M. Pedersen Zari und K. Hecht, „Biomimicry for regenerative built environments: mapping design strategies for producing ecosystem services,“ *Proceedings of the TensiNet Symposium 2019*, 2019.
- [238] R. McNeel & Associates, *Grasshopper - Neu in Rhino 6*, 2022. Adresse: <https://www.rhino3d.com/de/6/new/grasshopper/> (aufgerufen am 18. 03. 2022).
- [239] MIT Sustainable Design Lab, *Urban Modeling Interface 3.0*, 2022. Adresse: <https://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html> (aufgerufen am 18. 03. 2022).

A Anhang - Tabellen

Tabelle A.1 Treibhauspotenzial der optimierten Fernwärme Varianten

	Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äq.			
	v03a - FW		v03b - FW Ökostrom	
	Absolut + SD	Anteil	Absolut + SD	Anteil
Herstellung BK	-121.642 ± 7.156	-24,7 %	-120.845 ± 2.110	-52,8 %
Herstellung TGA	46.912 ± 3.081	9,5 %	8.257 ± 5.229	3,6 %
Nutzungsphase	197.577 ± 4.301	39,7 %	16.850 ± 875	7,4 %
Austausch BK	11.242 ± 736	2,3 %	11.036 ± 455	4,8 %
Austausch TGA	71.079 ± 3.177	14,4 %	30.885 ± 807	13,5 %
Entsorgung BK	276.517 ± 9.924	56,1 %	275.411 ± 2.926	120,2 %
Entsorgung TGA	9.073 ± 98	1,8 %	7.504 ± 30	3,3 %
Recyclingpotenzial	-121.688 ± 1.255		-121.548 ± 370	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	492.758	100 %	229.069	100 %

Tabelle A.2 Versauerungspotenzial der optimierten Fernwärme Varianten

	Versauerungspotenzial (AP) in kg SO ₂ -Äq.			
	v03a - FW		v03b - FW Ökostrom	
	Absolut + SD	Anteil	Absolut + SD	Anteil
Herstellung BK	361 ± 13	24,9 %	359 ± 4	43,9 %
Herstellung TGA	162 ± 16	11,2 %	16 ± 4	1,4 %
Nutzungsphase	624 ± 81	43,0 %	295 ± 20	36,0 %
Austausch BK	74 ± 3	5,1 %	73 ± 2	8,9 %
Austausch TGA	179 ± 16	12,4 %	30 ± 4	3,6 %
Entsorgung BK	46 ± 0	3,1 %	46 ± 0	5,6 %
Entsorgung TGA	4 ± 0	0,3 %	1 ± 0	0,1 %
Recyclingpotenzial	-158 ± 1		-158 ± 1	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	1.449	100 %	818	100 %

Tabelle A.3 Eutrophierungspotenzial der optimierten Fernwärme Varianten

	Eutrophierungspotenzial (EP) in kg Phosphat-Äq.			
	v03a - FW		v03b - FW Ökostrom	
	Absolut + SD	Anteil	Absolut + SD	Anteil
Herstellung BK	80 ± 3	24,8 %	80 ± 1	35,3 %
Herstellung TGA	23 ± 1	7,0 %	11 ± 0	5,0 %
Nutzungsphase	156 ± 23	48,2 %	83 ± 6	36,9 %
Austausch BK	21 ± 1	6,4 %	20 ± 1	9,0 %
Austausch TGA	35 ± 1	10,8 %	23 ± 0	10,1 %
Entsorgung BK	8 ± 0	2,6 %	8 ± 0	3,7 %
Entsorgung TGA	1 ± 0	0,3 %	0 ± 0	0,1 %
Recyclingpotenzial	-22 ± 0		-22 ± 0	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	323	100 %	226	100 %

Tabelle A.4 Ökologischer Flächenbedarf der Variante v03a (FW) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme

	Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha-Äq./a			
	GWP	AP	EP	Max
Wald	0,656	0,449	0,135	0,656
Grünland	0,312	0,267	0,022	0,312
Heide	0,013	0,007	0,001	0,013
Sumpf	0,011	0,003	0,001	0,011
Moor	0,014	0,000	0,001	0,014
Gewässer	-	0,041	0,01	0,041
Summe				1,046

Tabelle A.5 Ökologischer Flächenbedarf der Variante v03b (FW mit Ökostrom) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme

	Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha-Äq./a			
	GWP	AP	EP	Max
Wald	0,305	0,254	0,094	0,305
Grünland	0,145	0,151	0,015	0,151
Heide	0,006	0,004	0,001	0,006
Sumpf	0,005	0,002	0,000	0,005
Moor	0,006	0,000	0,000	0,006
Gewässer	-	0,023	0,006	0,023
Summe				0,496

Tabelle A.6 Treibhauspotenzial der optimierten Wärmepumpe Varianten; Angegeben sind die absoluten Werte, die jeweiligen Standardabweichungen SD und die relativen Anteile an den Gesamtemissionen

	Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äq.			
	v04a - LW-WP		v04b - LW-WP Ökostrom	
	Absolut + SD	Anteil	Absolut + SD	Anteil
Herstellung BK	-165.901 ± 3.326	-28,6 %	-109.671 ± 3.818	-47,0 %
Herstellung TGA	53.484 ± 1.947	9,2 %	9.890 ± 761	4,2 %
Nutzungsphase	245.668 ± 5.825	42,4 %	8.663 ± 309	3,7 %
Austausch BK	17.385 ± 852	3,0 %	14.680 ± 922	6,3 %
Austausch TGA	79.739 ± 2.028	13,8 %	34.401 ± 790	14,7 %
Entsorgung BK	339.323 ± 5.075	58,6 %	267.758 ± 5.540	114,7 %
Entsorgung TGA	9.383 ± 82	1,6 %	7.638 ± 30	3,3 %
Recyclingpotenzial	-129.823 ± 737		-122.325 ± 737	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	579.081	100 %	233.357	100 %

Tabelle A.7 Versauerungspotenzial der optimierten Wärmepumpe Varianten

	Versauerungspotenzial (AP) in kg SO ₂ -Äq.			
	v04a - LW-WP		v04b - LW-WP Ökostrom	
	Absolut + SD	Anteil	Absolut + SD	Anteil
Herstellung BK	441 ± 6	32,5 %	350 ± 7	62,9 %
Herstellung TGA	194 ± 7	14,3 %	26 ± 3	4,6 %
Nutzungsphase	344 ± 8	25,4 %	9 ± 0	1,7 %
Austausch BK	102 ± 4	7,5 %	74 ± 4	13,2 %
Austausch TGA	222 ± 8	16,4 %	50 ± 3	9,0 %
Entsorgung BK	46 ± 0	3,4 %	46 ± 0	8,3 %
Entsorgung TGA	5 ± 0	0,3 %	1 ± 0	0,1 %
Recyclingpotenzial	-162 ± 0		-160 ± 0	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	1.354	100 %	556	100 %

Tabelle A.8 Eutrophierungspotenzial der optimierten Wärmepumpe Varianten

	Eutrophierungspotenzial (EP) in kg Phosphat-Äq.			
	v04a - LW-WP		v04b - LW-WP Ökostrom	
	Absolut + SD	Anteil	Absolut + SD	Anteil
Herstellung BK	98 ± 1	41,3 %	77 ± 2	66,4 %
Herstellung TGA	16 ± 1	6,6 %	3 ± 0	2,6 %
Nutzungsphase	68 ± 2	28,6 %	1 ± 0	1,1 %
Austausch BK	27 ± 1	11,3 %	20 ± 1	17,0 %
Austausch TGA	20 ± 1	8,3 %	6 ± 0	5,4 %
Entsorgung BK	9 ± 0	3,6 %	8 ± 0	7,3 %
Entsorgung TGA	1 ± 0	0,4 %	0 ± 0	0,2 %
Recyclingpotenzial	-21 ± 0		-21 ± 0	
Summe (ohne Recyclingpotenzial)	238	100 %	116	100 %

Tabelle A.9 Ökologischer Flächenbedarf der Variante v04a (LW-WP) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme

	Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha-Äq./a			
	GWP	AP	EP	Max
Wald	0,771	0,420	0,100	0,771
Grünland	0,367	0,249	0,016	0,367
Heide	0,015	0,006	0,001	0,015
Sumpf	0,013	0,003	0,000	0,013
Moor	0,016	0,000	0,000	0,016
Gewässer	-	0,038	0,006	0,038
Summe				1,219

Tabelle A.10 Ökologischer Flächenbedarf der Variante v04b (LW-WP Ökostrom) in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme

	Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha-Äq./a			
	GWP	AP	EP	Max
Wald	0,311	0,172	0,048	0,311
Grünland	0,148	0,102	0,008	0,148
Heide	0,006	0,006	0,000	0,006
Sumpf	0,005	0,001	0,000	0,005
Moor	0,006	0,000	0,000	0,006
Gewässer	-	0,016	0,003	0,016
Summe				0,492

Tabelle A.11 ELD des bundesweiten Bausektors in Bezug auf die verschiedenen Ökosysteme

	Ökologischer Flächenbedarf (ELD) in ha-Äq./a			
	GWP	AP	EP	Max
Wald	21.665.384	4.836.554	1.061.670	21.665.384
Grünland	10.304.715	2.870.521	172.786	10.304.715
Heide	416.520	71.984	5.852	416.520
Sumpf	360.450	36.682	7.124	360.450
Moor	446.674	76.086	8.573	446.674
Gewässer	-	440.859	63.384	440.859
Summe				33.634.602

B Anhang - Ökobilanzdaten

Bauteilflächen

• Außenwand	532 m ²
• Bodenplatte	358 m ²
• Dach	321 m ²
• Decke	746 m ²
• Fenster	233 m ²
• Innenwand	1.223 m ²

Variante v01

Tabelle B.1 Außenwand der Variante v01

Außenwand (Bauteilschichten von innen nach außen)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
20	Kalkzement Putzmörtel	30
180	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50
100	EPS-Hartschaum (Styropor) für Wände und Dächer W/D 035	40
20	WDVS Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch	40

Tabelle B.2 Bodenplatte der Variante v01

Bodenplatte (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
80	Zementestrich	50
60	EPS-Hartschaum (Styropor) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P 035	50
2	Bitumenbahn G 200 S4	50
240	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50
40	XPS-Dämmstoff	50

Tabelle B.3 Dach der Variante v01

Dach (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
4	Bitumenbahn G 200 S4	40
180	EPS-Hartschaum (Styropor) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P 035	40
0,5	Dampfbremse PA	40
240	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50

Tabelle B.4 Decken der Variante v01

Decke (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
80	Zementestrich	50
60	EPS-Hartschaum (Styropor) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P 035	50
240	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50

Tabelle B.5 Innenwand (Massiv) der Variante v01

Innenwand (Massiv)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
20	Kalkzement Putzmörtel	50
175	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50
20	Kalkzement Putzmörtel	50

Tabelle B.6 Innenwand (Leicht) der Variante v01

Innenwand (Leicht)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
25	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	50
100	Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)	50
25	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	50

Variante v02**Tabelle B.7** Außenwand EG der Variante v02

Außenwand EG (Bauteilschichten von innen nach außen)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
20	Kalkzement Putzmörtel	30
180	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50
180	EPS-Hartschaum (Styropor) für Wände und Dächer W/D 035	40
20	WDVS Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch	40

Tabelle B.8 Außenwand 1.OG der Variante v02

Außenwand 1.OG (Bauteilschichten von innen nach außen)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
20	Kalkzement Putzmörtel	30
300	Mauerziegel (Dämmstoff gefüllt)	50
60	EPS-Hartschaum (Styropor) für Wände und Dächer W/D 035	40
20	WDVS Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch	40

Tabelle B.9 Außenwand 2.OG der Variante v02

Außenwand 2.OG (Bauteilschichten von innen nach außen)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
20	Kalkzement Putzmörtel	30
175	Kalksandstein Mix	50
180	EPS-Hartschaum (Styropor) für Wände und Dächer W/D 035	40
20	WDVS Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch	40

Tabelle B.10 Bodenplatte der Variante v02

Bodenplatte (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
80	Zementestrich	50
60	EPS-Hartschaum (Styropor) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P 035	50
2	Bitumenbahn G 200 S4	50
240	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50
120	XPS-Dämmstoff	50

Tabelle B.11 Dach der Variante v02

Dach (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
4	Bitumenbahn G 200 S4	40
230	EPS-Hartschaum (Styropor) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P 035	40
0,5	Dampfbremse PA	40
240	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50

Tabelle B.12 Decken der Variante v02

Decke (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
80	Zementestrich	50
60	EPS-Hartschaum (Styropor) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P 035	50
240	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50

Tabelle B.13 Innenwand (Massiv) der Variante v02

Innenwand (Massiv)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
20	Kalkzement Putzmörtel	50
175	Kalksandstein Mix	50
20	Kalkzement Putzmörtel	50

Tabelle B.14 Innenwand (Leicht) der Variante v02

Innenwand (Leicht)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
25	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	50
100	Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)	50
25	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	50

Variante v03 und v04

Tabelle B.15 Außenwand der Varianten v03 und v04

Außenwand (Bauteilschichten von innen nach außen)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
20	Kalkzement Putzmörtel	30
130	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	50
	Holzfaserdämmstoff (Dicke abhängig von der Optimierungsvariante)	50
40	VHF: Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE)	40

Tabelle B.16 Bodenplatte der Varianten v03 und v04

Bodenplatte (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
80	Zementestrich	50
60	EPS-Hartschaum (Styropor) für Decken/Böden und als Perimeterdämmung B/P 035	50
2	Bitumenbahn G 200 S4	50
240	Transportbeton C20/25	50
	Bewehrungsstahl 2 %	50
	XPS-Dämmstoff (Dicke abhängig von der Optimierungsvariante)	50

Tabelle B.17 Dach der Varianten v03 und v04

Dach (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
4	Bitumenbahn G 200 S4	40
	Holzfaserdämmstoff (Dicke abhängig von der Optimierungsvariante)	40
0,5	Dampfbremse PA	40
130	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	50

Tabelle B.18 Decken der Varianten v03 und v04

Decke (Bauteilschichten von oben nach unten)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
80	Zementestrich	50
60	Holzfaserdämmstoff	50
130	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	50

Tabelle B.19 Innenwand (Massiv) der Varianten v03 und v04

Innenwand (Massiv)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
130	Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	50

Tabelle B.20 Innenwand (Leicht) der Varianten v03 und v04

Innenwand (Leicht)		
Schichtdicke in mm	Material und Datensatz	Lebensdauer in Jahren
25	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	50
100	Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)	50
25	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	50

Technische Gebäudeausrüstung

Tabelle B.21 Verwendete Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung

Komponenten der Technischen Gebäudeausrüstung		
Bezeichnung	Datensatz	Lebensdauer in Jahren
Fernwärme	Übergabestation Fernwärme	20
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Strom Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10kW	20
Sole-Wasser-Wärmepumpe	Strom Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 10kW	20
Sole-Wasser-Wärmepumpe	Strom Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 10kW	20
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Strom Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 10kW	20
Gas-Brennwertkessel	Gas-Brennwertkessel 20-120 kW (Standardgerät)	20
Hackschnitzelkessel	Hackschnitzelkessel 20-120 kW	20
Pelletkessel	Pelletkessel 20-120 kW	20
Speicher	Pufferspeicher (Edelstahl)	20
Photovoltaikanlage	Photovoltaiksystem 1200 kWh/m ² a (ohne Stromgutschrift)	20
Solarthermieanlage	Solaranlage Vakuumröhrenkollektor	20
Rohre Erdkollektor	Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 10 kW	50
Rohre Erdsonde	Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 10 kW	50
Fußbodenheizung	Fußbodenheizung PP (100 mm Abstand)	50
Radiatoren	Heizkörper	50

Parkplatz

Tabelle B.22 Verwendete Datensätze für den Asphalt und die Pflastersteine

Materialien		
Bezeichnung	Datensatz	Lebensdauer in Jahren
Asphalt	Asphalttragschicht	50
Asphalttragschicht	Asphalttragschicht	50
Granulat	Kies 2/32	50
Pflastersteine	Betonpflastersteine	50

