

Masterthesis

Transformation urbaner Räume

Aus Parkraum wird Lebensraum

**Nachhaltigkeitsbewertung im Hochbau auf ökologischer Ebene an dem Beispiel einer
Umnutzung und Aufstockung des Parkhauses am Carlsplatz in Düsseldorf**

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

im Studiengang

Architektur

mit der Vertiefung

Nachhaltiges Bauen und Gebäudeperformance

an der

Bergischen Universität Wuppertal



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

von

Marvin Kaliga

Jesinghauser Straße 28, 58332 Schwelm

marvin.kaliga@uni-wuppertal.de

Matrikel-Nr.: 1623432

Wuppertal, 04. März 2024

Erstprüfer der Thesis:

Lehrstuhl für Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung

Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss

Erstprüferin des Entwurfes:

Lehrstuhl für Baukonstruktion, Entwurf und Materialkunde

Prof. Dipl.-Ing. Annette Hillebrandt

Kurzfassung

Die autogerechte Stadt: diese städtebaulichen Bestrebungen führten die letzten Jahrzehnte zu einem enormen Aufkommen an gebauter Infrastruktur für den PKW. Doch durch die aufkommenden Nachhaltigkeitsdiskussionen stehen diese städtebaulichen Entscheidungen der Nachkriegszeit in der Kritik. Viele Straßen sind überlastet und der Verkehr blockiert sich selbst¹. Daher hat sich der Trend gewendet: Es werden Bestrebungen lauter, urbane Ballungszentren autofrei zu entwerfen. Durch diesen Trend können Parkhäuser in urbanen Agglomerationen als ruhende Reserve angesehen werden. Während diese Gebäude in attraktiver Innenstadt Nähe aktuell nur für das Parken genutzt werden, können diese Flächen in einem zukünftigen Szenario wieder zu Lebensräumen für den Menschen transformiert werden.

Doch dem Gebäude- und Bausektor ist ein hoher Emissionsausstoß und ein hoher Ressourcenbedarf zuzuschreiben. In der Europäischen Union entfallen dabei in etwa 50 Prozent der geförderten Rohstoffe und die Hälfte des Energieverbrauches auf den Bau und die Nutzung von Gebäuden.² Zusätzlich ist dem Bausektor in Deutschland mehr als die Hälfte des Abfallaufkommens zuzuordnen.³

Diese Arbeit zeigt an dem Beispiel einer Umnutzung und Aufstockung eines Parkhauses in Düsseldorf am Carlsplatz zu einem Wohn- und Bürogebäude auf, wie die Schaffung von neuem Lebens- und Arbeitsraum in einer urbanen Agglomeration mit den aktuellen Nachhaltigkeitsbestrebungen vereinbart werden können.

Dazu wurden drei unterschiedliche Konstruktionsvarianten eines Entwurfes mit unterschiedlichen Energieversorgungskonzepten in einer Lebenszyklusanalyse untersucht. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbilanzierung über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes.

Durch die Ergebnisse dieser Nachhaltigkeitsanalyse wurden Rückschlüsse darauf gezogen, dass aus der Nutzung der bereits existierenden Bausubstanz zur Errichtung der Transformation das höchste Kreislaufpotenzial der verwendeten Materialien und der geringste Einsatz von Primärrohstoffen resultiert. Zusätzlich wird durch die Nutzung von regenerativen Energiequellen der Emissionsausstoß des Gebäudes im Vergleich zu Referenzwerten deutlich minimiert.

1 tagesschau - Verkehr in deutschen Städten wird immer zäher, 2024 - <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/stau-hamburg-berufsverkehr-pendeln-grossstadt-verkehr-100.html> [Zugriff 10.01.2024]

2 Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, (... zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor), Brüssel 2014

3 Statistisches Bundesamt, Abfallbilanz, Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge - <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> [Zugriff am 27.02.2024]

Abstract

The car-friendly city: these urban planning endeavours have led to an enormous amount of infrastructure being built for cars in recent decades. However, these post-war urban planning decisions are now being criticised as a result of the emerging debate on sustainability. Many roads are overloaded and traffic blocks itself.¹ The trend has therefore changed: Efforts to design car-free urban centres are becoming louder. This trend means that multi-storey car parks in urban agglomerations can be seen as a dormant reserve. While these buildings in attractive city centre locations are currently only used for parking, in a future scenario these areas can be transformed back into living spaces for people.

However, the building and construction sector is characterised by high emissions and a high demand for resources. In the European Union, the construction and use of buildings accounts for around 50 per cent of the raw materials extracted and half of the energy consumed.² In addition, the construction sector in Germany accounts for more than half of the waste generated.³

Using the example of the conversion and extension of a multi-storey car park on the Carlsplatz in Düsseldorf into a residential and office building, this thesis shows how the creation of new living and working space in an urban agglomeration can be reconciled with current sustainability efforts.

To this end, three different construction variants of a design with different energy supply concepts were analysed in a life cycle analysis. The focus of this work is on a holistic sustainability assessment over the entire life cycle of the building.

Based on the results of this sustainability analysis, conclusions were drawn that the use of the existing building fabric for the construction of the transformation results in the highest recycling potential of the materials used and the lowest use of primary raw materials. In addition, the use of renewable energy sources significantly minimises the building's emissions compared to reference values.

Gender Erklärung: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser wissenschaftlichen Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Formulierungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abkürzungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	x
Abbildungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Relevanz der Thematik	1
1.2 Fragestellung und Zielsetzung	3
1.3 Vorgehen und Strukturierung der Arbeit	4
2 Theorie	5
2.1 Definition von Nachhaltigkeit	5
2.2 Gesetzliche Vorgaben im Hochbau	6
2.3 Lebenszyklusanalyse	7
2.4 Bilanzierungsgrenzen	11
2.4.1 Cradle to Gate	11
2.4.2 Cradle to Grave	11
2.4.3 Cradle to Cradle	11
2.5 Kreislaufpotenzial der Materialien	12
2.6 Global Warming Potential	16
2.7 Zertifizierungssysteme	19
2.7.1 Ökologische Nachhaltigkeit	19
2.7.2 Ökonomische Nachhaltigkeit	20
2.7.7 Soziale Nachhaltigkeit	20
2.8 Bewertungs- und Zertifizierungssysteme im Vergleich	21
2.9 QNG-Siegel	22
3 Methodik	24
3.1 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen	24
3.2 Kreislaufpotenzial der Konstruktion	25
3.4 Global Warming Potential	28
3.5 Strategische Indikatoren	32
3.5.1 Flächeneffizienz	33
3.5.2 Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit	33
3.5.3 Flächeninanspruchnahme	34
3.5.4 Mobilitätsinfrastruktur	35
3.5.5 Biodiversität	35
3.6 Ergebnisdarstellung	36

4	Entwurf	38
4.1	Grundstück und Bestand	38
4.2	Entwurfsdarstellung.....	39
4.3	Konstruktion	44
4.3.1	Konstruktionsvariante 1.....	44
4.3.2	Konstruktionsvariante 2.....	45
4.3.3	Konstruktionsvariante 3.....	46
4.3.4	Fenster	46
4.4	Anlagentechnik und Energieversorgung.....	52
4.4.1	Allgemeinstrombedarf.....	52
4.4.2	Wärmebedarf Trinkwarmwasser.....	52
4.4.3	Energiebedarf Raumwärme.....	53
4.4.4	Photovoltaik.....	54
4.4.5	Stromspeicher.....	56
4.5	Strategische Indikatoren	56
4.5.1	Flächeneffizienz.....	57
4.5.2	Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit.....	57
4.5.3	Flächeninsparuchnahme	57
4.5.4	Mobilitätsinfrastruktur.....	58
4.5.5	Biodiversität	58
4.6	Weitere relevante Parameter.....	58
5	Ergebnisse	59
5.1	Kreislaufpotenzial der Konstruktion.....	60
5.1.1	Konstruktionsvariante 1.....	60
5.1.1.1	Bilanzraum 1.....	60
5.1.1.2	Bilanzraum 2.....	60
5.1.2	Konstruktionsvariante 2.....	62
5.1.3	Konstruktionsvariante 3.....	64
5.2	Global Warming Potential	66
5.2.1	Konstruktion.....	68
5.2.2	Anlagentechnik.....	68
5.2.3	Energiebedarf.....	69
5.2.4	Kumulierte Ergebnisse	70
5.3	Strategische Indikatoren	72
5.4	Gesamtbewertung und Einordnung der Ergebnisse.....	73

6 Diskussion	74
6.1 Limitationen der Bewertungen.....	76
6.1.1 Kreislaufpotenzial der Konstruktion	76
6.1.2 Global Warming Potential	76
6.1.2.1 Konstruktion.....	78
6.1.2.2 Anlagentechnik.....	78
6.1.2.3 Energiebedarf	79
6.1.3 Strategische Indikatoren	79
6.2 Zukunftsszenario.....	80
6.3 Rückbezug auf die Forschungsfrage.....	82
6.4 Ausblick des Forschungsgebietes	82
7 Fazit	83
Literatur- und Quellenverzeichnis	84
Anhang.....	88
Entwurfszeichnungen.....	88
Aufteilung der Flächenverhältnisse	94
Emissionsfaktoren der Energieträger.....	94
Wärmedurchgangskoeffizientenberechnung.....	95
Benutzeroberfläche Excel-Tool	96
Emissionsfaktoren.....	98
Screenshot Concular Materialangebot.....	99
Eidesstattliche Erklärung.....	100

Abkürzungsverzeichnis

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
°C	Grad Celsius
a	Jahr
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodoogy
CLP	Closed Loop Potenzial
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBF	Energiebezugsfläche
EnEV	Energieeinsparverordnung
GEG	Gebäudeenergiegesetz
Gt/a	Gigatonnen pro Jahr
GWP	Global Warming Potential
K	Kelvin
kg	Kilogram
kgCO ₂ e/m ² EBFa	Kilogram Kohlenstoffdioxid-Äquivalente pro Quadratmeter Energiebezugsfläche im Jahr
kW _p	Kilowatt peak
kWh/a	Kilowattstunde im Jahr
kWh/m ²	Kilowattstunde pro Quadratmeter
kWh/(m ² EBFa)	Kilowattstunde im Jahr pro Quadratmeter Energiebezugsfläche
LCA	Life Cycle Assessment
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LP	Loop Potenzial
MEoL	Material End of Life
MLP	Material-Loop-Potenzial
MRC	Material Recycling Content
NGF	Nettogrundfläche
PENRE	Primärenergieeinsatz - nicht erneuerbar
ppm	parts per million
TWW	Trinkwarmwasser
UMI	Urban Mining Indicator

Symbole, Bedeutung und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m ²
f	Faktor	-
Q	Endenergiebedarf	kWh
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
V	Volumen	m ³

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
η	Wirkungsgrad	-
θ	Temperatur	°C
φ	Performance Ratio	-
Σ	Summe	-

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Wirkungsgradindikatoren verschiedener Treibhausgase	S. 16
Tabelle 2	Faktoren zur Bewertung der Flächeneffizienz	S. 33
Tabelle 3	Spezifische Biotopflächenfaktoren zur Bewertung des objektbezogenen Biotopenflächenfaktors	S. 36
Tabelle 4	Referenzkennwerttabelle, Daten aus: Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): Zielparame-ter für klimaneutrale Nichtwohn-gebäude im Bestand	S. 52
Tabelle 5	Relevante Parameter des Referenzgebäudes und der drei Konstruk-tionsvarianten	S. 58
Tabelle 6	GWP der Anlagentechnik des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten	S. 69
Tabelle 7	Gegenüberstellung des flächenspezifischen Energiebedarfs und des flächenspezifischen GWP's	S. 70
Tabelle 8	Flächenspezifische kumulierte GWP's des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten	S. 72
Tabelle 9	Erreichte Prozentpunkte der strategischen Faktoren der drei unter-schiedlichen Konstruktionsvarianten	S. 73
Tabelle 10	Faktoren der Wirkabschätzung der drei Konstruktionsvarianten unterteilt in das Kreislaufpotenzial der Konstruktion, dem Global Warming Potential und der strategischen Indikatoren	S. 75
Tabelle 11	Gegenüberstellung der flächenspezifischen kumulierten GWP's unterteilt in Konstruktion, Anlagentechnik und des Energiebedarfs des Referenzgebäudes, der drei Konstruktionsvarianten und einem weiteren Szenario	S. 81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Entwicklung der globalen Bevölkerungszahl (a), des globalen Verbrauches fossiler Rohstoffe (b), der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration (c) und der globalen Rohstoffentnahme (d), Quelle: Institut für Wasser, Ressourcen und Umwelt (IWARU), Münster	S. 2
Abbildung 2	Gegenüberstellung des Drei-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit (a) und der Vorrangmodells der Nachhaltigkeit (b) in Anlehnung an Hegger et al - Energie Atlas, Nachhaltige Architektur, 2007	S. 6
Abbildung 3	Phasen einer Ökobilanzierung in Anlehnung an Stephan Anders nach DIN15978, eigene Darstellung	S. 8
Abbildung 4	Aufteilung der Lebenszyklusmodule einer Ökobilanzierung nach DIN 15978	S. 9
Abbildung 5	Systemgrenzen einer Ökobilanzierung, eigene Darstellung	S. 12
Abbildung 6	Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen, Quelle: Hillebrandt et al - Recycling Atlas 2018	S. 13
Abbildung 7	Biotopischer und technischer Verwertungskreislauf in Anlehnung an die Cradle-to-Cradle Strategie von Braungart / Mc Donough, Quelle: Hillebrandt/Seggewies, Atlas Recycling, Detail Verlag, 2018	S. 14
Abbildung 8	Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen, Quelle: Hillebrandt et al - Recycling Atlas 2018	S. 15
Abbildung 9	Entwicklung des Primärenergiebedarfs von Wohngebäuden und Verteilung auf die Energiedienstleistungen in kWh/(m ² a) basierend auf Hegger, M. et al., 2012 - EcoEasy Abschlussbericht	S. 17
Abbildung 10	Gegenüberstellung des nicht erneuerbaren Energieeinsatzes (PENRE) und des GWP's von Beton (C20/25) (a) und Holz (Durchschnitt Deutschland, heimische Fichte) (b), Datenquelle: Ökobaudat	S. 18

Abbildung 11	Vergleich der drei auf dem deutschen Markt vertretenen Zertifizierungssysteme in Anlehnung an „Guide to Sustainable Building Certifications“	S. 21
Abbildung 12	Methodische Bewertungsstruktur für die Bewertung der Nachhaltigkeit im Rahmen dieser Arbeit	S. 25
Abbildung 13	Berechnungsverfahren des Urban-Mining-Indicators des UMI-Tools von Anja Rosen	S. 26
Abbildung 14	Schematischer Aufbau des Loop- und Closed-Loop-Potenzials im Pre- und Post-Use nach Anja Rosen	S. 27
Abbildung 15	Bewertungsschema der strategischen Indikatoren, eigene Darstellung	S. 32
Abbildung 16	Flächeneffizienz nach DGNB ECO2.1	S. 33
Abbildung 17	Fragenkatalog zur Bewertung der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit in Anlehnung an den Kriterienkatalog ECO2.1 der DGNB	S. 34
Abbildung 18	Bewertung der Flächeninanspruchnahme in Anlehnung an den Kriterienkatalog ENV2.3 der DGNB	S. 34
Abbildung 19	Fragenkatalog zur Bewertung der Mobilitätsinfrastruktur in Anlehnung an den Kriterienkatalog TEC3.1 der DGNB	S. 35
Abbildung 20	Bewertung des objektbezogenen Biotopenflächenfaktors in Anlehnung an DGNB ENV2.4	S. 36
Abbildung 21	Netzdiagramm der Ergebnisdarstellung, eigene Darstellung	S. 37
Abbildung 22	Foto vom Bestandsgebäude, Quelle: https://www.carlsplatz-markt.de/der-markt [Zugriff am 19.01.2024]	S. 38
Abbildung 23	Lageplan der Transformation M 1:1250, eigene Darstellung	S. 39

Abbildung 24	Axonometrie der Transformation, eigene Darstellung	S. 40
Abbildung 25	Grundriss 1. Obergeschoss Bestand M 1:500, eigene Darstellung	S. 41
Abbildung 26	Grundriss 1. Obergeschoss Transformation M 1:500, eigene Darstellung	S. 41
Abbildung 27	Ansicht Nord der Transformation M 1:500, eigene Darstellung	S. 43
Abbildung 28	Schnitt AA der Transformation M 1:500, eigene Darstellung	S. 43
Abbildung 29	Material-Cycle-Status Floatglas für Isolierverglasungen nach Hillebrandt/Seggewies, Atlas Recycling	S. 46
Abbildung 30	Details der untersten Geschossdecken der drei Konstruktionsvarianten, M 1:20, eigene Darstellung	S. 47
Abbildung 31	Details der Außenwände der drei Konstruktionsvarianten, M 1:20, eigene Darstellung	S. 48
Abbildung 32	Details der Innenwände der drei Konstruktionsvarianten, M 1:20, eigene Darstellung	S. 49
Abbildung 33	Details der Geschossdecken der drei Konstruktionsvarianten, M 1:20, eigene Darstellung	S. 50
Abbildung 34	Details der Dächer der drei Konstruktionsvarianten, M 1:20, eigene Darstellung	S. 51
Abbildung 35	Dachaufsicht des Entwurfes, Solare Einstrahlung auf die für die Photovoltaikanlage vorgesehene Dachfläche der Transformation, eigene Darstellung	S. 55
Abbildung 36	Fragenkatalog der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit der Konstruktionsvariante 1 (KV1), Konstruktionsvariante 2 (KV2) und Konstruktionsvariante 3 (KV3)	S. 57

Abbildung 37	Fragenkatalog der Mobilitätsinfrastruktur der Konstruktionsvariante 1 (KV1), Konstruktionsvariante 2 (KV2) und Konstruktionsvariante 3 (KV3)	S. 57
Abbildung 39	Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 1, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 61
Abbildung 40	Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 1, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 61
Abbildung 41	Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 63
Abbildung 42	Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 63
Abbildung 43	Gegenüberstellung des Kreislaufpotenzials (Closed-Loop-Potential) der Außenwände oberhalb des Erdreiches in Holzbauweise (links) und der Außenwände der Tiefgarage aus Stahlbeton (rechts)	S. 64
Abbildung 44	Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 65
Abbildung 45	Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 65
Abbildung 46	Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 3, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 67
Abbildung 47	Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 3, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen	S. 67

Abbildung 48	Vergleich des GWP's unter der Aufteilung der Lebenszyklusmodule in Anlehnung an die DIN15978	S. 68
Abbildung 49	Gegenüberstellung des GWP's der Anlagentechnik des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung	S. 69
Abbildung 50	Gegenüberstellung der flächenspezifischen kumulierten Endenergiebedarfe (a) und dem kumulierten flächenspezifischen GWP (b) des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung	S. 71
Abbildung 51	Flächenspezifische kumulierte GWP's aus Konstruktion, Anlagentechnik und Energiebedarf des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung	S. 72
Abbildung 52	Erreichter Anteil der strategischen Faktoren der drei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten	S. 73

1 Einleitung

1.1 Relevanz der Thematik

Bereits heute lebt die Hälfte aller Menschen in urbanen Agglomerationen. Mit steigendem Trend: Laut aktueller Studienlage wird dieser Anteil bei einer höheren Weltbevölkerungszahl zur Jahrhundertmitte auf etwa 70 % steigen.⁴ Auch in Deutschland lässt sich dieser Trend abzeichnen. Durch den Krieg zwischen Russland und der Ukraine und weiteren angespannten geopolitischen Lagen auf globaler Ebene resultiert ein positives Wanderungssaldo und eine Erhöhung der Einwohnerzahl in Deutschland.⁵ Zudem steigt der Platzbedarf an Wohnraum pro Person kontinuierlich. Während 1991 die durchschnittliche Wohnfläche pro Person in Deutschland bei 34,9 m² lag, betrug diese im Jahr 2021 47,7 m².⁶ Vor allem in urbanen Stadtzentren besteht ein hoher Bedarf an neuem Wohnraum. Durch steigende Mietpreise ist Düsseldorf als die Landeshauptstadt von Nordrhein-Westfalen eine der Städte mit den höchsten Mietpreisen.⁷ Um den steigenden Bedarf gerecht zu werden und um hohe Mietpreise zu vermeiden, gilt es in urbanen Lagen zusätzlichen Wohnraum zu schaffen.

Ebenfalls verändern sich durch neue Dynamiken auf dem Arbeitsmarkt und unter anderem durch die Corona-Pandemie der Bedarf an den gebauten Arbeitsraum: das Arbeiten aus dem Remote und der damit verbundene Platzbedarf an Co-Working-Spaces gewinnt an Bedeutung.⁸

Demgegenüber stehen urbane Flächen, die in Zukunft an Bedeutung verlieren werden. Aufgrund lauter werdender Bestrebungen urbane Stadtzentren autofrei zu gestalten und der Entwicklung von künstlicher Intelligenz und des autonomen Fahrens wird der aktuelle Fahrzeugbestand und das Aufkommen an ruhendem Individualverkehr im Wesentlichen in dicht bebauten urbanen Regionen voraussichtlich signifikant sinken.⁹ Ein Resultat aus dieser Prognose ist es, dass attraktive Flächen im urbanen Raum einer neuen Nutzung zugeführt werden können: Parkhäuser in urbanen

4 United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2012) - https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/technical/TP2011-3_SevenBillionandGrowing.pdf [Zugriff am 27.12.2023]

5 Pestel Institut gGmbH 2023 - Bauen und Wohnen in der Krise Aktuelle Entwicklungen und Rückwirkungen auf Wohnungsbau und Wohnungsmärkte - <https://bauen-und-wohnen-in-deutschland.de/wp-content/uploads/2023/01/Studie-Bauen-und-Wohnen-in-der-Krise.pdf>, [Zugriff am 18.11.2023]

6 Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023 - https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_N041_31.html#:~:text=Rein%20rechnerisch%20hatte%20eine%20Person,rund%2037%20%25%20binnen%2030%20Jahren [Zugriff am 18.11.2023]

7 Handelsblatt - Mietpreise in Deutschland: In diesen Städten sind die Mieten pro Quadratmeter am höchsten - <https://www.handelsblatt.com/finanzen/immobilien/mietpreise-in-deutschland-in-diesen-staedten-sind-die-mieten-pro-quadratmeter-am-hoechsten/25430390.html> [Zugriff am 18.11.2023]

8 Schürmann, M et al - Coworking Space, Geschäftsmodell für Entrepreneure und Wissensarbeiter

9 eassy - die fünf Dimensionen der automobilen Transformation - https://www.pwc.de/de/automobilindustrie/pwc_automotive_eassy-studie.pdf [Zugriff am 14.01.2024]

Ballungsräumen werden redundant und diese Flächen können zur Deckung des steigenden Bedarfes einer neuen und attraktiveren Nutzung zugeführt werden.

Doch die Errichtung von neu gebauten Wohn- und Arbeitsflächen geht einher mit einer hohen Belastung der Umwelt. Bereits 1972 veröffentlichte der Club of Rome, ein Zusammenschluss von Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen aus verschiedenen Fachbereichen, eine Studie mit dem Titel „Die Grenzen des Wachstums“, als welcher hervorging, dass es in einer endlichen Welt kein unendliches Wachstum geben könne, da durch planetare Grenzen Ressourcen nicht unerschöpflich seien.¹⁰ Der „Earth Overshoot Day“, der den Tag angibt, an dem die Menschheit alle natürlichen Ressourcen aufgebraucht hat, die die Erde innerhalb eines Jahres zur Verfügung stellen kann, fiel 2023 auf globaler Ebene auf den 2. August.¹¹ Dies bedeutet, dass die Menschheit aktuell 1,7 Erden bräuchte, um den Bedarf an Ressourcen nachhaltig decken zu können.

Die Abbildung 1 zeigt auf, dass immer mehr Ressourcen der Erdoberfläche entnommen werden. Zusätzlich stieg mit einer höher werdenden Bevölkerungszahl der Verbrauch fossiler Rohstoffe an, welcher maßgeblich für die steigende atmosphärische CO₂-Konzentration verantwortlich ist und laut dem Intergovernmental Panel on Climate Change (kurz: IPCC), ein zwischenstaatliches Gremium, das wissenschaftliche Informationen zum Klimawandel bewertet, entscheidend zu dem globalen Klimaveränderungen beiträgt.¹²

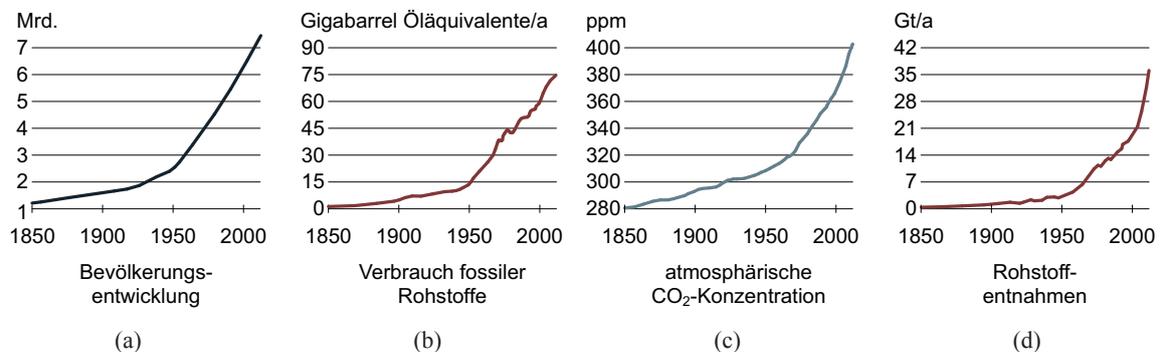


Abbildung 1 Entwicklung der globalen Bevölkerungszahl (a), des globalen Verbrauches fossiler Rohstoffe (b), der atmosphärischen CO₂-Konzentration (c) und der globalen Rohstoffentnahme (d), Quelle: Institut für Wasser, Ressourcen und Umwelt (IWARU), Münster

10 Club of Rome - Die Grenzen des Wachstums - <https://clubofrome.de/die-grenzen-des-wachstums/>, [Zugriff am 24.12.2023]

11 Global Footprint Network - <https://overshoot.footprintnetwork.org> [Zugriff am 14.01.2023]

12 IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C - https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/07/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf [Zugriff am 25.12.2023]

2019 betragen die globalen Treibhausgasemissionen 48 Gt CO₂ Äquivalente.¹³ Dabei sind rund 40 % dieser globalen Emissionen¹⁴ und ca. 50 % des Materialabfalls³ direkt oder indirekt auf dem Gebäude- und Bausektor zurückzuführen. Die Verwertungsquoten der Materialabfälle aus dem Gebäude- und Bausektor können derzeit nur auf einem niedrigen Qualitätsniveau erfüllt werden und die Bauwirtschaft ist derzeit von einer echten Kreislaufwirtschaft mit geschlossenen Stoffkreisläufen weit entfernt.¹⁵ Auf die Emissionen bezogen ist innerhalb des Gebäude- und Bausektors zwischen den Betriebsemissionen (direkt: Raumwärme und Warmwasser, indirekt: Allgemeinstrombedarf) und der sogenannten grauen Emissionen, also Emissionen, die aus der Herstellung, der Errichtung, dem Erhalt, dem Rückbau und der Aufbereitung und Entsorgung des Gebäudes resultieren, zu unterscheiden. Bei einem Gebäude, welches in Massivbauweise errichtet wird, entfallen etwa 30 % bis 40 % der CO₂e-Emissionen im Lebenszyklus auf die graue Energie der Baukonstruktion.¹⁶ Durch den steigenden Anteil der erneuerbaren Energie an der Energieversorgung in der Nutzungsphase eines Gebäudes gewinnt der relative Anteil der CO₂e-Emissionen aus Errichtung und Rückbau weiter an Relevanz.¹⁷

Aufgrund der hohen Treibhausgasemissionen und des hohen Ressourcenbedarfs im Bau- und Gebäudesektor ist eine Steigerung der Nachhaltigkeit in diesen Sektoren essenziell, um Nachhaltigkeitsziele der Europäischen Union, die europäische Wirtschaft bis 2050 zu einer modernen, nachhaltigen, ressourcen- und energieeffizienten Wirtschaft zu transformieren, erreichen zu können.

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Durch den Klimawandel und der Ressourcenknappheit ist die Menschheit dazu gezwungen neue Denkansätze und Technologien auszuarbeiten, um diesen Planeten auch für zukünftige Generationen bewohnbar hinterlassen zu können. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu liefern, wie eine

13 World Resources Institute, Climate Watch Historical GHG Emissions (1990-2020), <https://data.worldbank.org/indicator/en.atm.ghgt.kt.ce> [Zugriff am 24.12.2023]

14 Hegger, M. et al., 2012 - EcoEasy Abschlussbericht, Seite 1

3 Statistisches Bundesamt, Abfallbilanz, Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge - <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> [Zugriff am 27.02.2024]

15 Hillebrandt, A. et al. - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Rückbau, Verwertung und Entsorgung im Bauwesen, Seite 22

16 Özdemir, Ö et al - Nachhaltigkeit und Klimaschutz im Hochbau - vom Energieverbrauch in der Nutzung zur Lebenszyklusanalyse, in: 2023 Bauphysik Kalender: Nachhaltigkeit, Seite 3

17 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2019) - Klimaschutzbericht 2019 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung - https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzbericht_2019_kabinettsfassung_bf.pdf [Zugriff am 25.12.2023]

nachhaltige Bauweise dazu beitragen kann, den höher werdenden und sich veränderten Bedarf an gebautem Lebensraum in urbanen Ballungsgebieten zu decken und wie dies zeitgleich mit den Ansprüchen der Nachhaltigkeit zu kombinieren ist.

Da Parkhäuser in urbanen Stadtlagen in Zukunft prognostiziert an Relevanz verlieren werden, wird die Beantwortung dieser Fragestellung an dem Beispiel einer Umnutzung und Aufstockung eines Parkhauses in Innenstadtnähe in Düsseldorf zu einem Gebäude mit einer Mischnutzung aus Wohnen und Arbeiten hergeleitet. Dabei sollen im Wesentlichen die ökologischen Aspekte der Herstellung, der Errichtung, dem Betrieb, dem Erhalt, dem Rückbau und der Aufbereitung und Entsorgung berücksichtigt werden, um einen ganzheitlichen Einblick in die Nachhaltigkeitsperformance des Gebäudeentwurfes zu erlangen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen dazu beitragen, fundierte Entwurfs- und Konstruktionsentscheidungen für die Optimierung des Gebäudeentwurfes auf ökologischer Ebene herleiten zu können, indem verschiedene Konstruktionsvarianten des Entwurfes bilanziert und die Ergebnisse miteinander verglichen werden.

1.3 Vorgehen und Strukturierung der Arbeit

Die Arbeit ist gegliedert in die Theorie, die Methodik und der Darstellung der Ergebnisse mit anschließender Diskussion. In dem Theorieteil wird der aktuelle Forschungsstand des nachhaltigen Bauens aufgezeigt. Es werden aktuelle Erkenntnisse und verschiedene Systeme für das Vorgehen und die Bewertung einer Ökobilanzierung dargestellt und erläutert.

Anschließend wird aufgezeigt, welche Methodik angewendet wird, um die ökologische Nachhaltigkeit im Bauwesen im Rahmen dieser Arbeit bewerten zu können und wie diese Bewertung auf den projektspezifischen Entwurf angewendet wird. Dabei werden unterschiedliche Konstruktionen des Gebäudeentwurfes bilanziert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Die Darstellung der Ergebnisse und Erkenntnisse erfolgt durch die Darstellung der Bilanzierungen und die Darstellung der Entwurfspläne. .

In einer anschließenden Diskussion wird sich auf die Forschungsfrage zurückbezogen und die Beantwortung dieser aufgezeigt, gefolgt von einem kritischen Rückblick, den Limitationen dieser Arbeit und der Ausblick auf weitere Fragestellungen in diesem Themenfeld.

2 Theorie

2.1 Definition von Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit im Allgemeinen bezieht sich die auf Fähigkeit, Ressourcen so zu nutzen, dass sie nicht erschöpft werden oder die Umwelt dauerhaft geschädigt wird. Der Begriffsursprung ist in der Forstwirtschaft zu finden, wo er sich darauf bezieht, dass nur so viele Bäume gefällt werden sollten, wie nachwachsen können. Heutzutage hat der Begriff der Nachhaltigkeit eine viel breitere Bedeutung und bezieht sich auf verschiedene Aspekte des menschlichen Lebens und der Wirtschaft. Es gibt verschiedene Definitionen von Nachhaltigkeit, die jedoch häufig den Gedanken beinhalten, dass Maßnahmen und Entscheidungen so getroffen werden sollten, dass sie die Bedürfnisse der heutigen Generation erfüllen, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu erfüllen.¹⁸

Nachhaltigkeit umfasst eine ökologische, eine soziale und eine wirtschaftliche Dimension. Die ökologische Nachhaltigkeit orientiert sich dabei an dem Gedanken, die Umwelt und die Natur nur soweit zu beanspruchen, dass sich die natürlichen Lebensgrundlagen regenerieren können und diese somit generationenübergreifend ohne Einbuße selbsterhaltend bleiben können. Die ökonomische Nachhaltigkeit beschreibt das Prinzip, dass eine Gesellschaft nicht über ihren Bedürfnissen und Verhältnissen leben sollte, sodass die aktuelle Art zu wirtschaften dauerhaft betrieben werden kann. Die soziale Nachhaltigkeit beschreibt die Organisation einer Gesellschaft, die soziale Spannungen in jeglicher Art in Grenzen halten und Eskalationen in Konflikte vermeiden kann.

Dabei ist zwischen dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit und dem Vorrangmodell der Nachhaltigkeit zu unterscheiden. Bei dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit wird die wirtschaftliche Effizienz, die soziale Gerechtigkeit und die ökologische Tragfähigkeit als gleichberechtigt betrachtet. Dem gegenüber steht das Vorrangmodell der Nachhaltigkeit. Bei dem Vorrangmodell der Nachhaltigkeit ist die Ökologie, das Soziale und die Ökonomie nicht gleichgewichtet sondern erfährt eine Abstufung in der Relevanz. Das Vorrangmodell folgt der Beschreibung, dass ohne eine stabile ökologische Umwelt keine soziale Gesellschaft entstehen kann und dass ohne eine soziale Gesellschaft kein funktionierendes ökonomisches System existieren kann.

¹⁸ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung - <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700> [Zugriff am 14.01.2024]

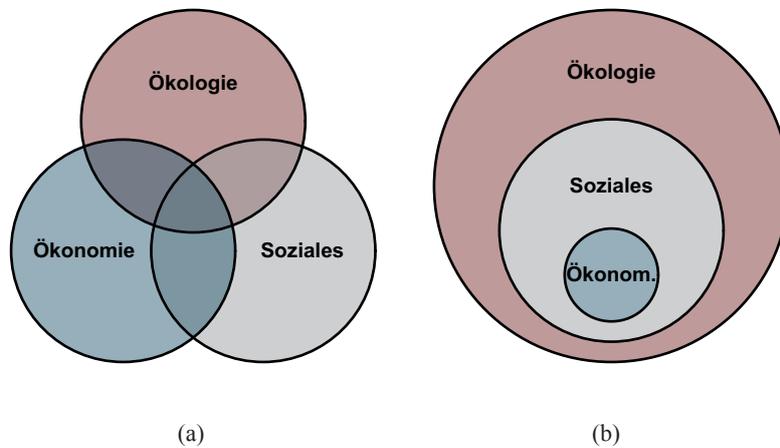


Abbildung 2 Gegenüberstellung des Drei-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit (a) und des Vorrangmodells der Nachhaltigkeit (b) in Anlehnung an Hegger et al - Energie Atlas, Nachhaltige Architektur, 2007

Im Bezug auf das Bauwesen bezieht sich das Thema der Nachhaltigkeit auf Prinzipien und Praktiken, die darauf abzielen, umweltfreundliche, sozial verantwortliche und wirtschaftlich tragfähige Bauprojekte zu entwickeln und zu realisieren

2.2 Gesetzliche Vorgaben im Hochbau

Das Gebäudeenergiegesetz (kurz: GEG) ist im November 2022 in Kraft getreten und hat die Energieeinsparverordnung (kurz: EnEV), das Energieeinspargesetz (kurz: EnEG) und das Erneuerbare-Energie-Wärmegesetz (kurz: EEWärmeG) reformiert und zusammengefügt. Das GEG reguliert im Wesentlichen den maximal zulässigen Energiebedarf eines Gebäudes im Neubau. Der relevante Parameter zur Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben ist der Primärenergiebedarf, der nach den Vorgaben der DIN 18599 bilanziert werden muss.¹⁹ Bei der Errichtung von Neubauten muss die Einhaltung dieses Gesetzes nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der Berechnung des Primärenergiebedarfs dürfen je nach Gebädekubatur festgesetzte Grenzwerte im Referenzhausverfahren nicht überschreiten. Zusätzlich sind in der Anlage des GEG's Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen bei Änderung an bestehenden Gebäuden oder bei

¹⁹ Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechtes für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze vom 8. August 2020 (Gebäudeenergiegesetz - GEG)

Neubauten gelistet. Bei dieser Bilanzierung bleiben jedoch Berechnungen des Energieeinsatzes für die Konstruktion, die sogenannte „graue Energie“ für die Rohstoffgewinnung, der Produktion und den Transport der Rohstoffe und Baumaterialien, unberücksichtigt. Eine Obergrenze des Emissionsausstoßes von einem Gebäude ist ebenfalls nicht im GEG aufgeführt. Zusätzlich muss nach GEG ein sommerlicher Wärmeschutz für Neubauten rechnerisch nachgewiesen werden.

Neben den allgemeinen chemikalienrechtlichen Beschränkungen für Schadstoffgehalte in Produkten gibt es weitere Vorschriften für Schadstoffe, die ausschließlich für Bauprodukte in bestimmten Anwendungen gelten. Diese Vorschriften wurden von verschiedenen deutschen Behörden zum Schutz von Umwelt und Gesundheit festgelegt.

2.3 Lebenszyklusanalyse

Um die Nachhaltigkeit von Gebäuden bewerten und berechnen zu können, werden Lebenszyklusanalysen benötigt. In einer Lebenszyklusanalyse wird die Bilanzierungsgrenze über die Betrachtung der Betriebsphase eines Gebäudes hinaus erweitert. Es wird analysiert, wo die Materialien für den Bau des Gebäudes herkommen, wie das Gebäude errichtet wird, wie das Gebäude genutzt wird und wie recyclingfreundlich die Konstruktion eines Gebäudes ist. Im Gegensatz zu dem Gebäudeenergiegesetz werden bei einer Lebenszyklusanalyse neben dem Energiebedarf weitere Aspekte, wie beispielsweise der Emissionsausstoß, die Schadstoffverwendung, die Flächeninanspruchnahme und die Flächenversiegelung, der Wasserbedarf und die Wahl der Rohstoffe in Bezug auf die Recyclingfreundlichkeit, betrachtet und bewertet.

Die ökologische Betrachtung des Lebenszyklus wird als Ökobilanzierung oder auf englisch „Life Cycle Assessment“ (kurz: LCA) bezeichnet. Die DIN 15978 und die DIN EN ISO 14040 bieten einen Rahmen für eine Ökobilanzierung und definieren den Begriff der Ökobilanzierung wie folgt:

„Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z.B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“).“²⁰

20 DIN EN 15978:2012-10

Eine Ökobilanzierung ist dabei in drei verschiedene Phasen unterteilt:

- Die erste Phase ist die Zielsetzung und die Begrenzung des Untersuchungsrahmens. Dabei umfasst die Systemgrenze die Prozesse, die bei der Bewertung berücksichtigt werden. Prozesse außerhalb des Bilanzraumes bleiben unberücksichtigt.
- Die zweite Phase ist die Aufstellung der Sachbilanz. In dieser Phase werden alle relevanten Daten gesammelt und strukturiert. Als Beispiel sind hier Umweltproduktdeklarationen der verwendeten Baumaterialien und Flächenaufstellungen des Gebäudeentwurfes zu nennen.
- In der dritten Phase erfolgt die Wirkungsabschätzung. In dieser Phase wird anhand der Daten der Sachbilanz der Output für die Umwelt und das Klima ausgegeben.

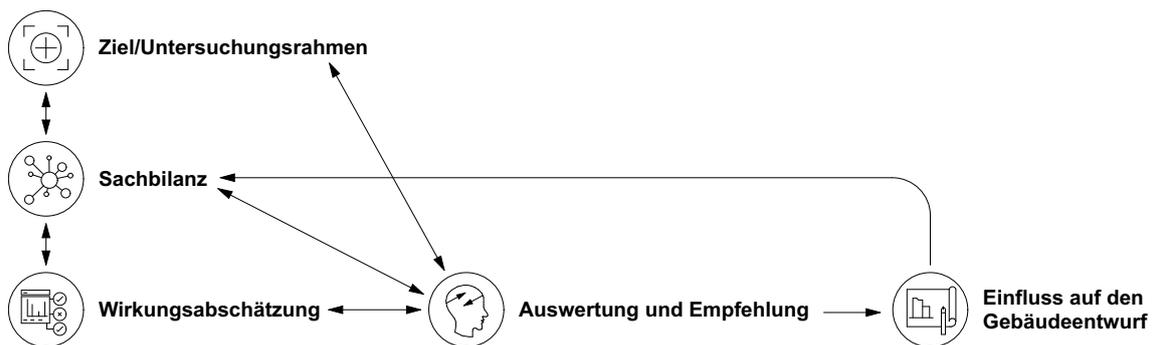


Abbildung 3 Phasen einer Ökobilanzierung in Anlehnung an Stephan Anders nach DIN15978, eigene Darstellung

Aus allen drei Phasen können Rückschlüsse auf den Gebäudeentwurf gezogen werden, aus denen Entwurfs- und Konstruktionsentscheidungen im weiteren Planungsprozess resultieren. Neben der Abschätzung der Emissionen kann ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Entwurfs- und Konstruktionsvarianten erfolgen, um das bestmögliche Ergebnis erzielen zu können. Außerdem wird durch einen Variantenvergleich ersichtlich, wo die größten Hebel vorhanden sind, um die Auswirkungen auf Umwelt und Klima reduzieren zu können. Durch die Wirkabschätzung der Ökobilanzierung kann die Entwicklung und Verbesserung von Entwürfen und Konstruktionen hergeleitet werden, eine strategische Planung erfolgen und es können politische Entscheidungsprozesse beeinflusst werden.

Bei einer Lebenszyklusanalyse wird eine Lebensdauer eines Gebäudes von 50 Jahren angenommen. Das Bilanzierungsgebäude wird dabei in der Anlehnung an die DIN 15978 in verschiedene Phasen beziehungsweise Lebenszyklusmodule unterteilt. Diese Phasen sind der Rohstoffabbau zur Herstellung der Baustoffe über die Verarbeitung, die Nutzungsphase des Gebäudes, den Rückbau bis hin zur Aufbereitung oder Verwendung der Materialien am Ende des Lebenszyklus des Gebäudes. Bei der ökologischen Bilanz wird der Lebenszyklus unterteilt in das Modul A - die Herstellungs- und Errichtungsphase, das Modul B - die Nutzungsphase, das Modul C - der Entsorgungsphase und das Modul D, welches außerhalb des Systems ergänzende Informationen deklariert. Jedes Lebenszyklusmodul beinhaltet weitere untergeordnete Module (vgl. Abbildung 4).

Lebenszyklusmodule	Herstellung			Errichtung		Betrieb und Nutzung							Rückbau und Abfallbehandlung				Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze
Modulgruppe	A1-3			A4-5		B1-7							C1-4				D
	Rohstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport	Errichtung/Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Instandhaltung/Reperatur	Austausch	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau/Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Entsorgung	Recyclingpotential
Module DIN EN 15978	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1

Abbildung 4 Aufteilung der Lebenszyklusmodule einer Ökobilanzierung nach DIN 15978

Die Daten für die Erstellung einer Ökobilanzierung können aus verschiedenen Datenbanken entnommen werden. Die in Deutschland gängigste Datenbank ist die Ökobaudat, welche durch das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) kostenlos online zur Verfügung gestellt wird. Diese Datenbank stellt Informationen zu Baumaterialien und Bau- und Transportprozessen zur Verfügung. Alternativ können für eine Ökobilanzierung Umweltproduktdeklarationen von Baumaterialien (kurz: EPD) verwendet werden. Hersteller von Baumaterialien können solche Produktdeklarationen nach den Vorgaben der DIN 15804 produktspezifisch anfertigen lassen.

In der Normung für die Erstellung einer Ökobilanz eines Gebäudes wird jedoch keine konkrete Gewichtung der verschiedenen Parameter oder tatsächliche Richtwerte als Obergrenze auf Gebäudeebene festgelegt.²¹ Eine Bewertung der Ökobilanz auf der Gebäudeebene in Anlehnung an die DIN 15978 ist lediglich die Summierung der Indikatoren der Umweltauswirkungen und die Indikatoren für die Verwendung von Ressourcen.²²

Die Indikatoren der Umweltauswirkung nach DIN EN 15978 sind:

- Treibhauspotenzial, GWP [kg CO₂ äquiv]
- Potential für den Abbau der stratosphärischen Ozonschicht [kg CFC 11 äquiv]
- Potential für die Versauerung von Boden- und Wasserressourcen; AP [kg SO₂ äquiv]
- Eutrophierungspotential, EP [kg (PO₄)³ äquiv]
- Potential für die Bildung von bodennahem Ozon, POCP [kg Ethen äquiv]
- Potential für den abiotischen Abbau, ADP-Elemente [kg Sb äquiv]
- Potential für den abiotischen Ressourcenverbrauch von fossilen Brennstoffen, ADP [MJ]

Die Indikatoren für die Verwendung von Ressourcen nach DIN EN 15978 sind:

- Erneuerbare Primärenergie als Energieträger - PERE [MJ]
- Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung - PERM [MJ]
- Nicht erneuerbare Primärenergie als Energieträger - PENRE [MJ]
- Nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung - PENRM [MJ]
- Einsatz von Sekundärstoffen - SM [kg]
- Erneuerbare Sekundärbrennstoffe - RSF [MJ]
- Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe - NRSF [MJ]
- Einsatz von Süßwasserressourcen - FW [m³]

Außerdem werden Komponenten für die Wiederverwendung und die Stoffe zum Recycling in der DIN-Norm als Parameter gelistet. Die Art der Konstruktionsverbindungen, die Rückbaufreundlichkeit der Konstruktion und die Möglichkeit der sortenreinen Materialtrennung nach einer Demontage werden dabei jedoch nicht berücksichtigt. Außerdem wird bei einer Ökobilanzierung nach DIN-Norm keine Flächeneffizienz, Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit des Gebäudes, Flächeninanspruchnahme, Mobilitätsinfrastruktur oder Biodiversität bewertet. Dies zeigt aktuell Grenzen einer Ökobilanzierung nach DIN-Norm auf.

21 DIN EN 15643 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden

22 DIN EN 15978:2012-10 - <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-15978/164252701m> [Zugriff am 14.12.2023]

2.4 Bilanzierungsgrenzen

Bei einer Ökobilanzierung von Produkten und Gebäuden können verschiedene Systemgrenzen oder auch Bilanzierungsgrenzen betrachtet werden. Die am häufigsten verwendeten Systemgrenzen für eine Ökobilanzierung für Produkte und Gebäude sind „Cradle-to-Gate“, „Cradle-to-Grave“ und „Cradle-to-Cradle“.

2.4.1 Cradle to Gate

Eine Systemgrenze, die oftmals berücksichtigt wird, ist die sogenannte „Cradle-to-Gate“-Grenze. Auf deutsch: von der Wiege bis zum Werkstor. Bei dieser Systemgrenze wird betrachtet, wo die Rohstoffe beschafft werden, wie diese zum Produktionsstandort transportiert werden und welcher Energiebedarf und Ressourceninput benötigt wird, um das Produkt herzustellen. Am Werkstor der Hersteller endet diese Betrachtung. Für diese Lebenszyklusmodule liegen oft sehr genaue Daten vor, da die Hersteller ihre Produktionsprozesse gut kennen.

Mit Bezug auf die Lebenszyklusmodule analog der DIN 15978 wäre dies der Betrachtungshorizont von der Rohstoffbeschaffung (Module A1) bis zur Produktion (Modul A3).

2.4.2 Cradle to Grave

In der „Cradle-to-Grave“-Analyse (auf deutsch: von der Wiege bis zum Grab) erweitert sich die Systemgrenze auf den Transport der Materialien zum Gebäude, die Errichtung, die Nutzung und das Lebensende des Gebäudes („End-of-Life Szenario“). Bei dem End-of-Life Szenario des Gebäudes wird der Rückbau, der Transport, die Abfallbehandlung und die Beseitigung betrachtet.

Mit Bezug auf die Lebenszyklusmodule analog der DIN 15978 wäre dies der Betrachtungshorizont von der Rohstoffbeschaffung (Module A1) bis zur Entsorgung (Modul C4).

2.4.3 Cradle to Cradle

Idealerweise sollte der Kreislauf des Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus geschlossen sein. Das mögliche Potenzial für die Wiederverwertung, Rückgewinnung und das Recycling der rückgebauten Materialien wird in der Systemgrenze „Cradle-to-Cradle“ (auf deutsch: von der Wiege bis zu Wiege) mit berücksichtigt.²³

²³ Hillebrandt, A. et al. - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Bewertungssysteme im Überblick, Seite 29

Mit Bezug auf die Lebenszyklusmodule analog der DIN 15978 wäre dies der Betrachtungshorizont von der Rohstoffbeschaffung (Module A1) bis zum Recyclingpotenzial (Modul D).

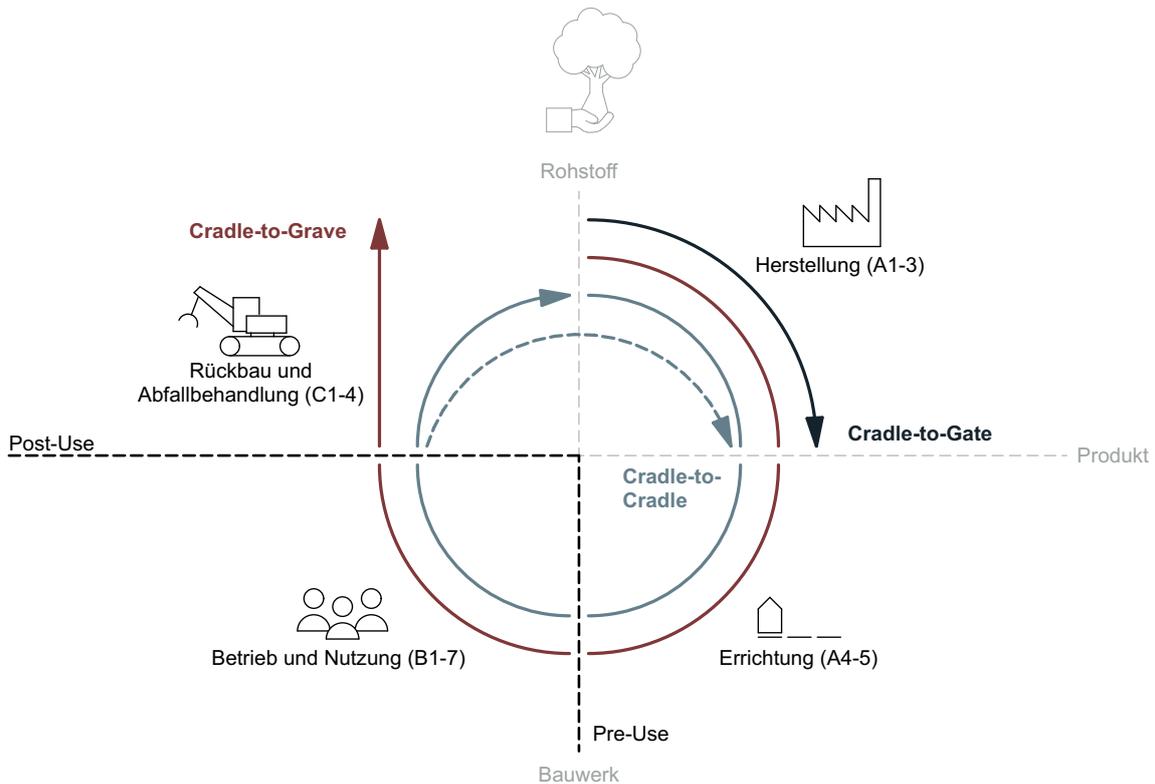


Abbildung 5 Systemgrenzen einer Ökobilanzierung, eigene Darstellung

2.5 Kreislaufpotenzial der Materialien

Da der Bausektor in etwa 50 % aller der von der Erde entnommenen Materialien verbraucht² und zu mehr als der Hälfte am Abfallaufkommen beteiligt ist,³ ist ein wesentlicher Indikator einer Ökobilanzierung das Kreislaufpotenzial der verwendeten Materialien der Konstruktion. Dabei ist zwischen wesentlichen Begriffen im Bezug auf die Kreislauffähigkeit der Materialien zu unterscheiden:

² Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, (... zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor), Brüssel 2014

³ Statistisches Bundesamt, Abfallbilanz, Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge - <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> [Zugriff am 27.02.2024]

- **Wiederverwendung:** Die Wiederverwendung von Materialien ist definiert durch eine erneute Verwendung eines gebrauchten Produktes für den gleichen Verwendungszweck unter Beibehaltung der Produktgestalt. Es findet also keine Auflösung der Produktgestalt des Produktes statt.
- **Wiederverwertung:** Unter einer Wiederverwertung von Produkten ist die Nachnutzung von Altstoffen in einen gleichartigen wie dem bereits durchlaufenem Produktionsprozess unter Auflösung der Produktgestalt zu verstehen. In diesem Prozess der Produktgestaltung können auch neue Rohstoffe dem Kreislauf zugeführt werden.
- **Weiterverwertung:** Unter Weiterverwertung versteht man die Nachnutzung von Altstoffen in einem von diesem zuvor noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess unter Auflösung der Produktgestalt. Der Qualitätsanspruch ist niedriger als beim Ausgangsprodukt (Downcycling).²⁴ Ein Teil der rückgebauten Produkte kann dabei auch außerhalb des Hochbauwesens genutzt werden.

Produkte, die weder wiederverwendet, wiederverwertet oder weiterverwertet werden, werden entweder der energetischen Nutzung überführt oder durch eine Deponierung beseitigt.

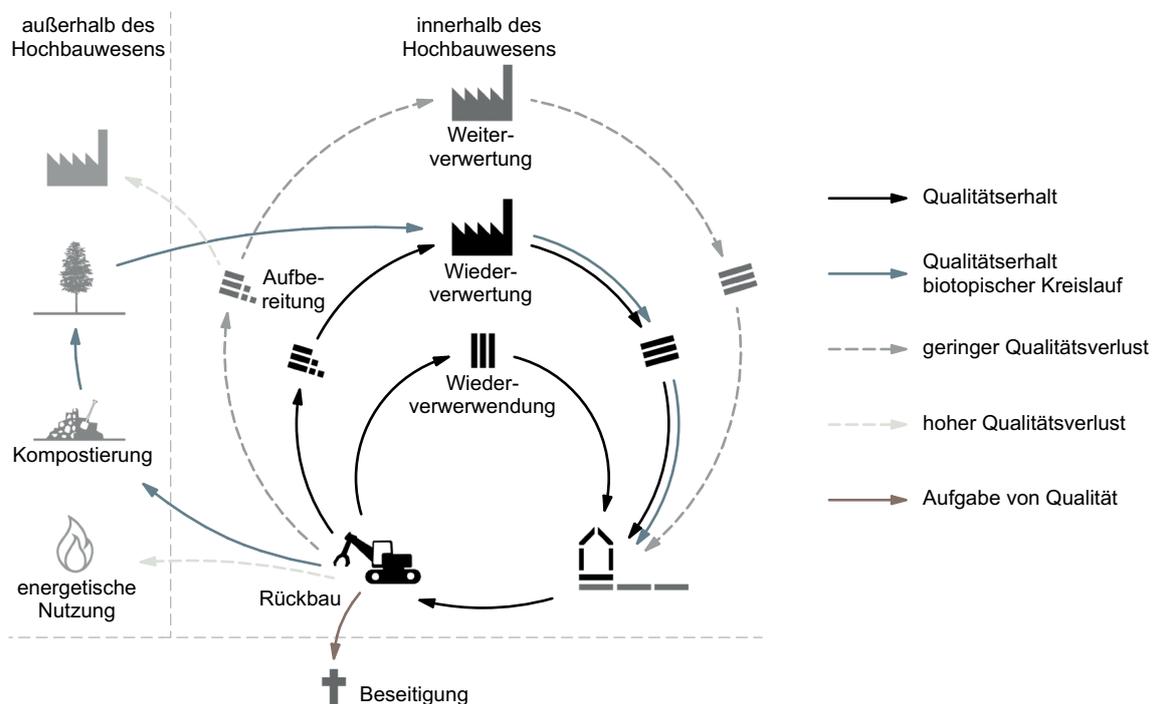


Abbildung 6 Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen, Quelle: Hillebrandt et al - Recycling Atlas 2018

Bei dem Kreislaufpotenzial der Materialien und bei dem stofflichen Recycling wird zwischen dem biotischen Kreislauf und dem technischen Kreislauf unterschieden:

- Unter einem biotischen Kreislauf ist die Verwendung von nachwachsenden Baumaterialien zu verstehen, die im End of Life Szenario nach einer Demontage kompostiert werden können. Es kann ein geschlossener Kreislauf geschaffen werden, wenn die Materialien durch die Kompostierung biologische Nährstoffe für neue Pflanzen schaffen, die dann wieder als Primärrohstoff in eine stoffliche Verwertung überführt werden können.
- Bei dem technischen Kreislauf werden Materialien im End of Life Szenario des Gebäudes einer industriellen Aufbereitung zugeführt. Ein hohes technisches Kreislaufpotenzial haben dabei die Materialien, die ohne relevanten Massenverlust und ohne Qualitätsverlust als Sekundärrohstoffe erneut einem Materialkreislauf überführt werden können. Neue Rohstoffe entstehen durch einen geschlossenen technischen Materialkreislauf durch die industrielle Aufbereitung der rückgebauten Materialien. Dieser technische Kreislauf ist jedoch mit einem hohen Energiebedarf verbunden.²⁵

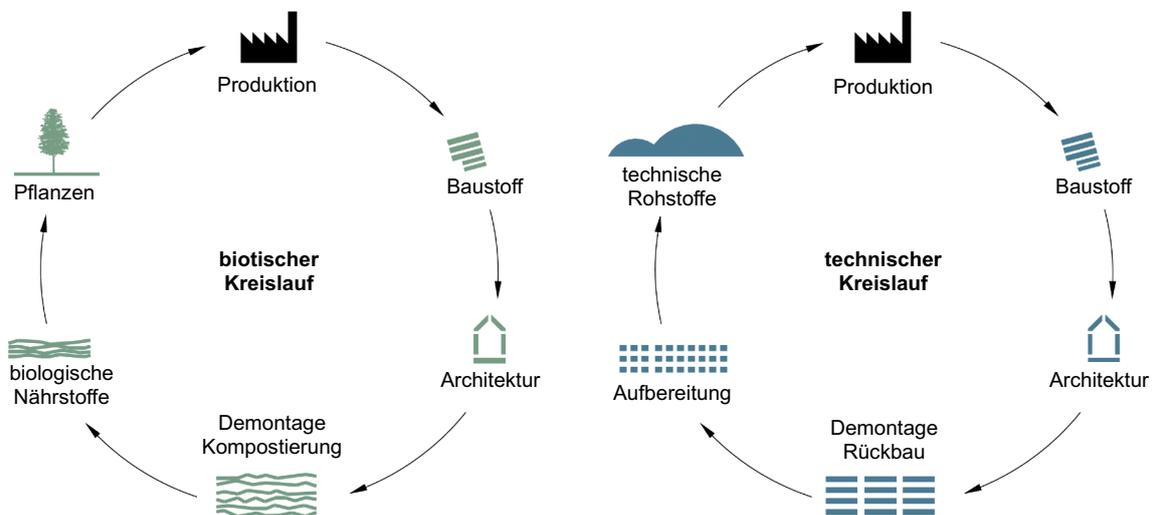


Abbildung 7 Biotischer und technischer Verwertungskreislauf in Anlehnung an die Cradle-to-Cradle Strategie von Braungart / Mc Donough, Quelle: Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, 2018, Seite 60

²⁵ Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Recyclingpotenziale von Baustoffen, Seite 58 ff.

Sowohl bei dem biotopischen Kreislauf, als auch bei dem technischen Kreislauf, ist es eine Voraussetzung, dass die Materialien bei der Demontage des Gebäudes sortenrein voneinander getrennt werden können. Kompositbauteile, für die verschiedene Materialien miteinander verklebt werden, können nicht oder nur unter deutlich höheren Umständen erneut in einen Stoffkreislauf überführt werden, da diese Bauteile durch die Verklebung nicht mehr sortenrein voneinander zu trennen sind. Ein Recycling auf gleicher Qualitätsstufe ist ebenfalls nicht möglich, wenn die Materialien im Herstellungsprozess eine Beschichtung oder einen Überzug erfahren haben

Auf der Materialebene gilt es dabei zwischen drei wesentlichen Parametern zur Quantifizierung des Kreislaufpotenzials zu unterscheiden:

- **Material Recycling Content (MRC):** Das Material Recycling Content bezieht sich auf die Pre-Use Phase und gibt den Anteil an Recyclingstoffen eines Materials bzw. eines Produktes an. Die Datengrundlage für das MRC bilden allgemeingültige Quellen und produktspezifische Herstellerangaben wie beispielsweise Umweltproduktdeklarationen.
- **Material Loop Potenzial (MLP):** Das Material Loop Potenzial bezieht sich ebenfalls auf die Pre-Use Phase eines Materials bzw. eines Produktes und gibt an, wie hoch der Anteil an Recyclingstoffen idealerweise sein könnte, wenn die Produkte hinsichtlich ihren Anteils an Sekundärrohstoffen optimiert werden würden.
- **Material End of Life (MEoL):** Das Material End of Life zeigt das Szenario im Post-Use auf, was heute mit einem Material bzw. mit einem Produkt am Ende des Lebenszyklus geschieht.²⁵

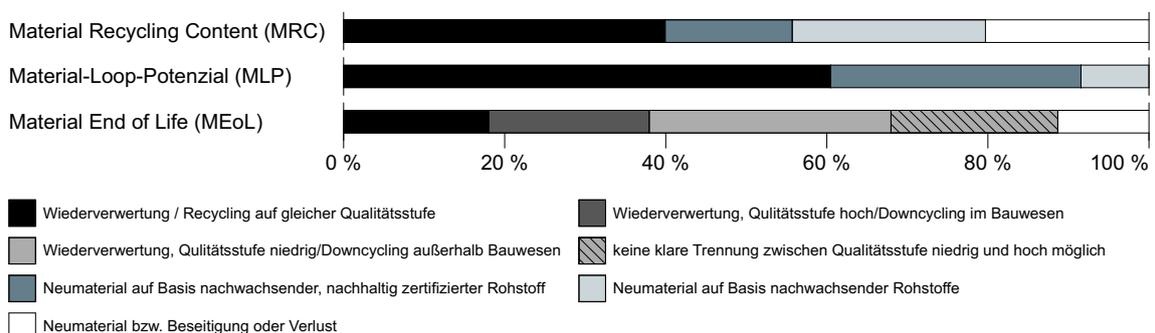


Abbildung 8 Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen, Quelle: Hillebrandt, A. et al - Recycling Atlas 2018

²⁵ Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Recyclingpotenziale von Baustoffen, Seite 58 ff.

2.6 Global Warming Potential

Rund 40 % der Treibhausgase resultieren aus der Gebäudeerstellung und Gebäudenutzung.² Damit trägt der Bau- und Gebäudesektor maßgeblich zu den globalen Klimaveränderungen bei. Daher ist ein weiterer relevanter Indikator einer Ökobilanzierung das Global Warming Potential (kurz: GWP).

Das Global Warming Potential ist die Summe aller Treibhausgasemissionen, die über alle Lebenszyklusphasen eines Gebäudes entstehen und einen Beitrag an den globalen Klimaveränderungen leisten. Das GWP wird in Kohlenstoffdioxidäquivalente (CO₂e) angegeben. Die Wirkleistung an dem Beitrag zur globalen Erderwärmung wird dazu je nach Treibhausgas mit dem entsprechenden Wirkungsgradindikator multipliziert. In der folgenden Tabelle sind entsprechenden Wirkungsgradindikatoren ausgewählter Treibhausgase gelistet:

Treibhausgas	GWP Wirkungsgradindikator [-]
Kohlendioxid (CO ₂)	1
Trichlormethan	5
Dichlormethan	9
Methan (CH ₄)	25
Lachgas (N ₂ O)	300

Tabelle 1 Wirkungsgradindikatoren verschiedener Treibhausgase

Der Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass beispielsweise eine Einheit Methan einen 25-mal höheren Einfluss auf den Beitrag zu den globalen Klimaveränderungen hat, als die selbe Einheit Kohlendioxid. Durch diese Art der Darstellung kann die Wirkleistung aller Treibhausgase zusammengefasst werden.

Ein signifikanter Anteil des GWP's resultiert unter anderem aus der Nutzung von Energie zur Herstellung für Materialien, also der grauen Energie. Der Anteil der Betriebsenergie gegenüber der grauen Energie hat sich durch immer effizientere Gebäudehüllen, effizienteren Anlagentechniken und einer gewandelten Baukultur über die Jahre verändert. In den 1980er Jahren, nach der 2. Wärmeschutzverordnung von 1984, war der maßgebliche Anteil des Energiebedarfs im Le-

² Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, (... zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor), Brüssel 2014

benzzyklus der Betrieb des Gebäudes. Mit der Verschärfung der Verordnungen wurde dieser Anteil reduziert. Bei einem Passivhausstandard macht die Betriebsenergie des Gebäudes nur noch die Hälfte bis Zweidrittel über einen Lebenszyklus von 50 Jahren aus.²⁶ Effizienzhäuser Plus benötigen annäherungsweise keinerlei Energie mehr für den Betrieb. Spätestens bei diesen Gebäuden wird deutlich, dass ein größerer Betrachtungshorizont im Vergleich zu den aktuellen Regulierungen bei einer Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden mit berücksichtigt werden muss.

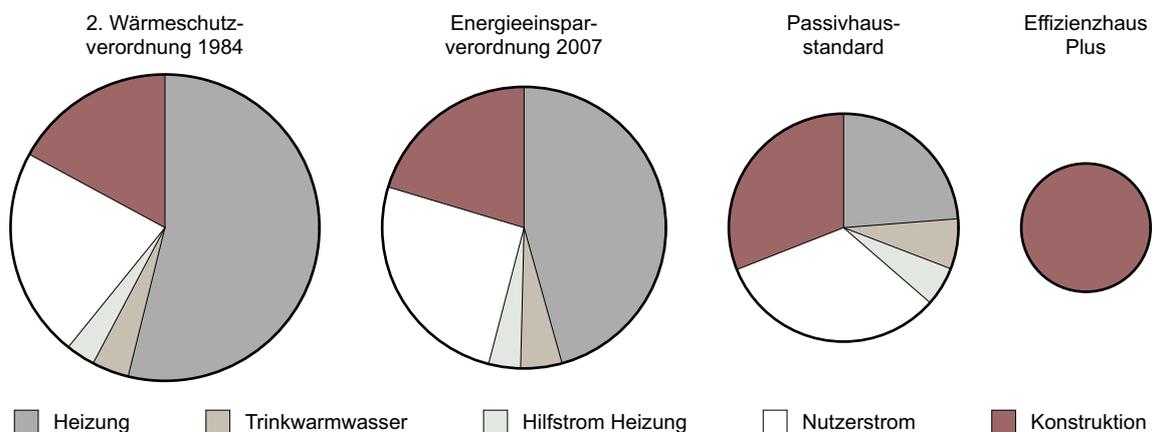


Abbildung 9 Entwicklung des Primärenergiebedarfs von Wohngebäuden und Verteilung auf die Energiedienstleistungen in kWh/(m2a) basierend auf Hegger, M. et al., 2012 - EcoEasy Abschlussbericht

In der Abbildung 10 (Seite 18) wird der nicht erneuerbare Energieeinsatz (PENRE) und das GWP unterteilt in die Lebenszyklusphasen A1-3, B4, C3-4, D und die Summe dieser Indikatoren von Holz und unbewehrtem Beton gegenüber gestellt. Der Energiebedarf für die Herstellung hat zwar einen Einfluss auf das GWP der Konstruktion des Gebäudes, der Abbildung ist jedoch zu entnehmen, dass das GWP nicht ausschließlich im direkten Zusammenhang mit dem nicht erneuerbaren Primärenergieeinsatz PENRE steht.

In der Herstellungsphase (A1-3) weist Beton im Vergleich zu Holz trotz eines höheren nicht erneuerbaren Energieeinsatzes ein höheres GWP auf. Dies resultiert neben dem hohen Energieeinsatz zur Herstellung des Zementes, welcher als Bindemittel im Beton dient, aus dem chemischen

²⁶ Hegger, M. et al., 2012 - EcoEasy Abschlussbericht, Seite 2 ff.

Prozessen in der Herstellungsphase. Bei Temperaturen von 1450 Grad Celsius entsteht aus Calciumcarbonat von Kalkstein unter Kohlenstoffdioxidabspaltung Calciumoxid; der Hauptbestandteil des Zements. Eine Reduktion der CO₂e-Emissionen ist daher bei der Produktion von Zement technisch als äußerst umständlich mit heutigen Technologien zu beschreiben.²⁷

Im Vergleich dazu weist Holz in der Herstellungsphase nach DIN 15978 ein negatives GWP auf. Dies resultiert aus der Tatsache, dass Holz im Lebenszyklus CO₂ aufnimmt und stofflich speichert. Gebäude aus Holz können daher als Lager der anthropogenen Treibhausgase bezeichnet werden. Dieses CO₂ wird jedoch in der Phase des Rückbaus und der Abfallbehandlung (C3 - 4) durch eine energetische Verwertung oder einer Kompostierung des Materials wieder in die Atmosphäre freigegeben. Durch eine Verdrängung von fossilen Brennstoffen in Form einer energetische Verwertung in dem Modul der Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze (D) resultiert in der Summe jedoch trotzdem ein negatives GWP in der Höhe von -50 kgCO₂e/m³. Beton hingegen erreicht durch eine fehlende Gutschrift außerhalb der Systemgrenze (D) je nach Betonrezeptur ein GWP von in etwa 200 kgCO₂/m³.

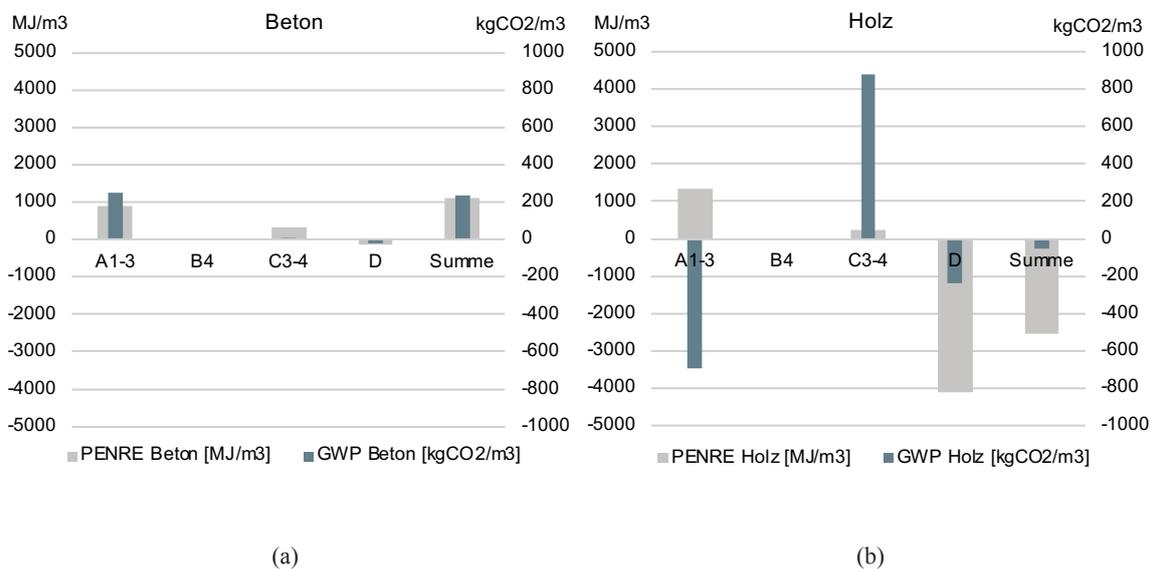


Abbildung 10 Gegenüberstellung des nicht erneuerbaren Energieeinsatzes (PENRE) und des GWP's von Beton (C20/25) (a) und Holz (Durchschnitt Deutschland, heimische Fichte) (b), Datenquelle: Ökobaudat

²⁷ Betonherstellung und Klimaschutz - <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/betonherstellung-und-klimaschutz-7229519> [Zugriff am 24.12.2023]

2.7 Zertifizierungssysteme

Da die bereits erwähnten DIN-Normen nur Rahmenbedingungen für eine Nachhaltigkeitsbewertung im Hochbau bieten und wesentliche Indikatoren nicht berücksichtigen, wurden von unterschiedlichen Akteuren, wie beispielsweise Netzwerken und Gesellschaften, diverse Zertifizierungssysteme entwickelt. Der Aufbau dieser Zertifizierungssysteme erfolgte teilweise in Anlehnung an die DIN-Normen, jedoch mit der Kombination einer Gewichtung der verschiedenen Indikatoren. Dadurch können gewisse Standards erreicht und Gebäude untereinander verglichen werden. Bei diesen Zertifizierungssystemen kann je nach Qualität des Bilanzierungsgebäudes ein Platin-, Gold-, Silber- oder Bronze-Status erreicht werden, um die Nachhaltigkeit zu kennzeichnen. Je nach Zertifizierungssystem kann jedoch die Auswahl und die Gewichtung der Bewertungsindikatoren stark unterschiedlich sein.

Die „Dreyer Foundation“ veröffentlichte 2018 im „Guide to Sustainable Building Certifications“ einen umfassenden Vergleich von zehn Zertifizierungssystemen und untersuchte diese auf die Wahl und die Gewichtung der Bewertungsindikatoren. Dabei wurde zwischen folgenden Bewertungsindikatoren unterschieden:

2.7.1 Ökologische Nachhaltigkeit

- **Umweltauswirkungen:** Verringerung der Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes durch den Einsatz von Lebenszyklusanalysen (LCA) zur Bewertung verschiedener Designstrategien.
- **Ressourcen:** Geringerer Einsatz von Ressourcen wie Energie, Materialien, Brennstoffen und Wasser. Vermeidung der Verwendung von begrenzten oder nicht erneuerbaren Ressourcen.
- **Biodiversität:** Unter Biodiversität ist die Begrenzung der Nutzung unbebauter Flächen oder Grünflächen für den Bau und die Optimierung der Nutzung von erschlossenen Flächen und Brachflächen als Beitrag zur Erhöhung der biologischen Vielfalt zu verstehen.
- **Kreislaufpotenzial:** Das Kreislaufpotenzial bezieht sich auf die stoffliche Ebene der verwendeten Materialien. Die Verwendung von nicht erneuerbaren Primärrohstoffen ist zu vermeiden. Für ein hohes Kreislaufpotenzial sind wiederverwendete, wiederverwertete oder weiterverwertete Materialien zu wählen. Alle Gebäudekomponente sind so zu konstruieren, dass eine sortenreine Demontage möglich ist. Bauabfälle auf der Baustelle sind zu vermeiden. Demontierte Bauelemente sind mit dem höchstmöglichen Wert durch eine Wiederverwendung oder Weiterverwendung wieder in einen neuen Stoffkreislauf zu überführen.
- **Toxizität:** Berücksichtigung der Verwendung problematischer Stoffe in der Baukonstruktion zur Reduzierung oder Vermeidung der Verwendung von giftigen Materialien.

2.7.2 Ökonomische Nachhaltigkeit

- Lebenszykluskostenrechnung: Berechnung der Lebenszykluskosten des Gebäudes, einschließlich der Baukosten und der Betriebskosten, z.B. für Reinigung, Instandhaltung und Ersatzbeschaffung.
- Flächennutzung: Optimierung der Bedarfsplanung und des Entwurfes für die bestmögliche Nutzung der Flächen.
- Wertbeständigkeit: Verwendung von Materialien von hoher Qualität und Robustheit, die gut altern und über einen längeren Zeitraum hinweg wertbeständig bleiben. Vorbereitung des Gebäudes auf zukünftige Veränderungen und Szenarien durch eine Gestaltung flexibler Gebäudestrukturen und Räume.

2.7.3 Soziale Nachhaltigkeit

- Sicherheit und Resilienz: Gewährleistung der Sicherheit der Menschen und der Sicherheit von Gebäuden und Versorgungseinrichtungen durch Brandschutz, Anpassung an die Klimaveränderungen, Tragstrukturen, Stabilität und Ähnliches. Schaffung von Verfahren für Notfälle und Planung für universelle und barrierefreie Zugänglichkeit.
- Behaglichkeit: Förderung des Wohlbefindens der täglichen Nutzer des Gebäudes in Bezug auf den physischen und gefühlten Komfort des Innenraumklimas. Gewährleistung von thermischem und visuellem Komfort, hochwertiger Akustik, Luft, Wasser, Licht und Tageslicht sowie eine hohe Nutzerkontrolle.
- Architektur: Schaffung einer Gestaltungsqualität in der Ästhetik und Raumplanung. Zugang zu attraktiven Außenbereichen sicherstellen. Einen Beitrag zur bestehenden Umwelt leisten.
- Mobilität: Planung von Möglichkeiten für ein nachhaltiges Mobilitätswesen am Standort und innerhalb des Gebäudes in Form der Ausarbeitung eines inkludierendes Mobilitätskonzeptes.
- Soziale Verantwortung: Gewährleistung einer nachvollziehbaren und verantwortungsvollen Beschaffung von Dienstleistungen und Baumaterialien. Konzentration auf die Arbeitsumgebung, insbesondere in der Bauphase.²⁸

28 The Dreyer Foundation - Guide to Sustainable Building Certifications - <https://gxn.3xn.com/wp-content/uploads/sites/4/2018/08/Guide-to-Green-Building-Certifications-August-2018-webflow-res.pdf> [Zugriff am 23.12.2023]

2.8 Bewertungs- und Zertifizierungssysteme im Vergleich

Derzeit lassen sich verschiedene Zertifizierungssysteme für die Bewertung der Nachhaltigkeit für ganze Gebäude im Hochbau auf dem deutschen Markt wiederfinden. Das Bewertungssystem der „Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen“ (kurz: „DGNB“) hatte 2022 mit einem Marktanteil von ca. 60 % der ausgestellten Zertifizierungen den höchsten Anteil. Das Zertifizierungssystem „Leadership in Energy and Environmental Design“ (kurz: „LEED“) hatte einen Marktanteil von ca. 17 % und das Zertifizierungssystem „Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology“ (kurz: „BREEAM“) von ca. 23%.²⁸ Der Abbildung 11 ist zu entnehmen, dass je nach Zertifizierungssystem die Schwerpunkte, also die Gewichtung der verschiedenen Indikatoren, anders definiert werden.

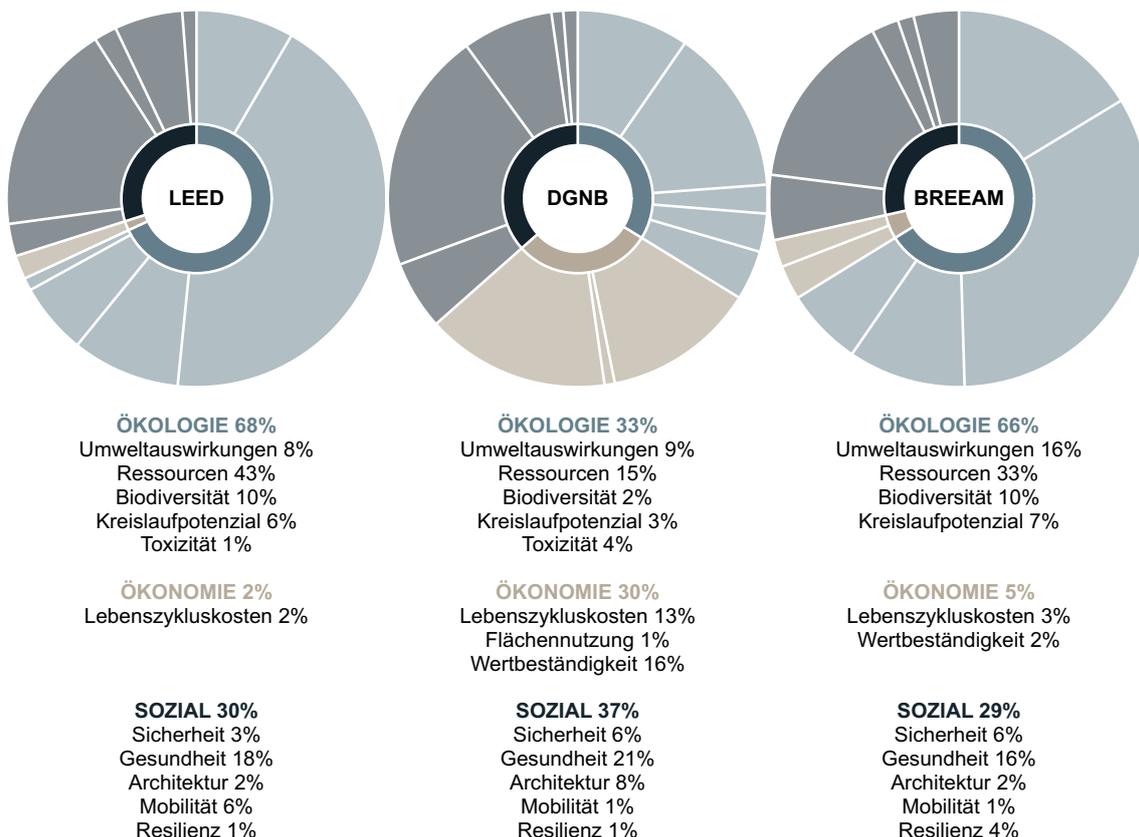


Abbildung 11 Vergleich der drei auf dem deutschen Markt vertretenen Zertifizierungssysteme in Anlehnung an „Guide to Sustainable Building Certifications“

²⁹ Market Focus 2023 - Investmentmarkt Green Buildings - <https://www.realestate.bnpparibas.de/marktberichte/investmentmarkt/deutschland-market-focus> [Zugriff am 15.12.2023]

Einzelne Lebenszyklusmodule sind zwar in der DIN EN 15978 definiert, ein genormtes Bewertungssystem für eine Ökobilanzierung analog der DIN EN 18599 für die energetische Bilanzierung eines Gebäudes in der Nutzungsphase existiert für eine Ökobilanzierung jedoch nicht.

Während das Bewertungssystem der DGNB ein hohes Maß an Gleichgewichtung zwischen der ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit (33 %, 30 % und 37 %) aufweist, dominieren sowohl im LEED Zertifizierungssystem mit 65 %, als auch im BREEAM Zertifizierungssystem mit 66 % die ökologische Nachhaltigkeit. Mit einer Gewichtung von 2 % bei dem LEED Zertifizierungssystem und 5 % bei dem BREEAM Zertifizierungssystem erfährt die ökonomische Nachhaltigkeit in diesen Zertifizierungssystemen nur eine untergeordnete Rolle.

Demnach ist das Zertifizierungssystem der DGNB dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit zuzuweisen. Die ökologische Nachhaltigkeit, die ökonomische Nachhaltigkeit und die soziale Nachhaltigkeit (vgl. Abbildung 2, Seite 6) wird als gleich wichtig und gleichberechtigt angesehen, bei der eine Nachhaltigkeit nur bei einer gleichwertigen Rücksichtnahme auf alle drei Nachhaltigkeitssäulen erreicht werden können.

Die Zertifizierungssysteme der LEED und BREEAM sind hingegen dem Vorrangmodell der Nachhaltigkeit zuzuweisen, bei dem die einzelnen Bereiche in ihrer Beziehung und Abhängigkeit zueinander gesehen werden (keine Wirtschaft ohne eine Gesellschaft, keine Gesellschaft ohne Ökologie). Die ökologische Nachhaltigkeit steht im Bezug der Gewichtung bei diesen Zertifizierungssystemen vorrangig vor der sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit.

Die Zertifizierungssysteme befinden sich in ständigen Entwicklungsprozessen, indem stetig Anpassungen und Aktualisierungen analog neuer Erkenntnisse vorgenommen werden.

2.9 QNG-Siegel

Neben den bereits existierenden Zertifizierungssystemen wurde von dem Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen im Jahr 2022 das „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude“ (kurz: QNG) eingeführt. Um dieses Siegel für ein Gebäude zu erhalten müssen ebenfalls Anforderungen der drei Nachhaltigkeitsdimensionen erfüllt werden.

Das Siegel ist dabei unterteilt in das „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude Plus“ (QNG-Plus) und das „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude Premium“ (QNG-Premium). Die Anforderungs-

niveaus orientieren sich dabei an überdurchschnittliche Anforderungen (QNG-Plus) bzw. deutlich überdurchschnittlicher Anforderungen (QNG-Permium) hinsichtlich der nachhaltigkeitsrelevanten Merkmale und Eigenschaften.

Grundvoraussetzung für die Verleihung des QNG ist eine Zertifizierung mit einem registrierten Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen. Die Bewertung geschieht dabei entsprechend der Systemregeln der Bewertungssysteme. Für Wohngebäude sind dies die Zertifizierungssysteme der DGNB, der BirN (Bauinstitut Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit) und der NaWoh (Qualitätssiegel Nachhaltiger Wohnungsbau). Für Nichtwohngebäude sind dies die Bewertungssysteme der DGNB und der BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen). Das Bewertungssystem BirN, NaWoh und BNB sind ebenfalls dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit zuzuweisen.

Um das QNG-Siegel zu erhalten müssen jedoch weitere festgesetzte Anforderungen erfüllt werden. Diese Anforderungen beziehen sich dabei auf feste flächenspezifische Grenzwerte der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfes, der nachhaltigen Materialgewinnung und der Vermeidung von Schadstoffen der verwendeten Baumaterialien. Diese Anforderungen sind zwar auch Teil der jeweiligen Zertifizierungssysteme, jedoch stellt das QNG deutlich verschärfte Anforderungen an diese Kriterien.³⁰

Da diese verschärften Anforderungen wesentlich der ökologischen Dimension zuzuordnen sind, entwickelt sich der Trend dieser Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitszertifizierung weg von dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit hin zu dem Vorrangmodell der Nachhaltigkeit mit einer höheren Gewichtung der ökologischen Dimension.

Seit dem 01.07.2022 können über Kreditanstalt für Wiederaufbau (kurz: KfW) staatliche Investitionszuschüsse und zinsvergünstigte Darlehen für die Errichtung nachhaltiger Gebäude und Sanierung von Gebäuden in nachhaltiger Bauweise der Bundesförderung effizienter Gebäude (kurz: BEG) beantragt werden, wenn diese durch die Zertifizierung mit dem QNG Siegel der Nachhaltigkeitsklasse (kurz: NH-Klasse) zuzuordnen sind.³¹

30 Informationsportal Qualitätssiegel Nachhaltiges Bauen - <https://www.qng.info/#> [Zugriff am 15.12.2023]

31 Informationsportal Nachhaltiges Bauen - <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/beg/> [Zugriff am 15.01.2023]

3 Methodik

3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel beziehungsweise der Untersuchungsrahmen im Rahmen dieser Arbeit ist die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit eines Entwurfes in Düsseldorf. Zur Abschätzung der Wirkleistung werden drei unterschiedliche Konstruktionen für diesen Entwurf erarbeitet, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht und miteinander verglichen werden. Aktuell befindet sich ein Parkhaus auf dem Grundstück.

Für diesen Vergleich und die Bewertung wurden drei Bewertungskriterien aufgestellt:

- **Kreislaufpotenzial der Konstruktion:** Das Kreislaufpotenzial der Konstruktion wird durch den Urban-Mining-Indicator bewertet. Für die Bilanzierung des Urban-Mining-Indicators wird das UMI-Tool, welches im Rahmen der Dissertation von Anja Rosen an der Bergischen Universität in Wuppertal entwickelt wurde, genutzt. Durch die Eingabe der verschiedenen Schichten und Materialien der Konstruktion wird der Urban-Mining-Indicator, welcher den Aufwand und die Rückbaubarkeit der Konstruktion und Konstruktionsverbindung berücksichtigt, ausgegeben. Für die weiterverwendeten Materialien des Bestandes wird zur Berechnung ein Anteil der wiederverwendeten Materialien in der Höhe von 100 % im Pre-Use dieser Bauteile angenommen.
- **Global Warming Potential:** Das Global Warming Potential (kurz: GWP) wird als Summe des GWP's des Bauwerkes (Konstruktion und Anlagentechnik) und des GWP's resultierend aus der Energienutzung in der Nutzungsphase bewertet. Zur Herleitung des GWP's für die Konstruktion wird ebenfalls das UMI-Tool genutzt. Für die Bestimmung des GWP's der Anlagentechnik wird ein Tabellenwerk mit typischen Referenzwerten genutzt (vgl. Tabelle im Anhang). Das GWP in der Nutzungsphase wird durch EnerCalc, entwickelt im Rahmen der Dissertation von Markus Lichtmeß an der Bergischen Universität in Wuppertal, bilanziert und mit der Energiebereitstellung durch Photovoltaik auf der Liegenschaft des Gebäudes gegengerechnet. Materialien und Bauteile, die im Zug der Transformation weiter genutzt werden, werden mit einem GWP von $0 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{a}$ angesetzt
- Weitere relevante strategische Bewertungsindikatoren, die nicht durch die Bewertung des Kreislaufpotenzials der Konstruktion und der Berechnung des GWP's abgedeckt werden, werden separat durch eine Bewertung und/oder einer Bilanzierung dargestellt. Die Grundlage für diese Bewertung bildet ein erarbeiteter Fragenkatalog in Anlehnung ausgewählter DGNB-Kriterien, die in der Planungsphase eines Gebäudes anhand von Entwurfszeichnungen beantwortet werden können.

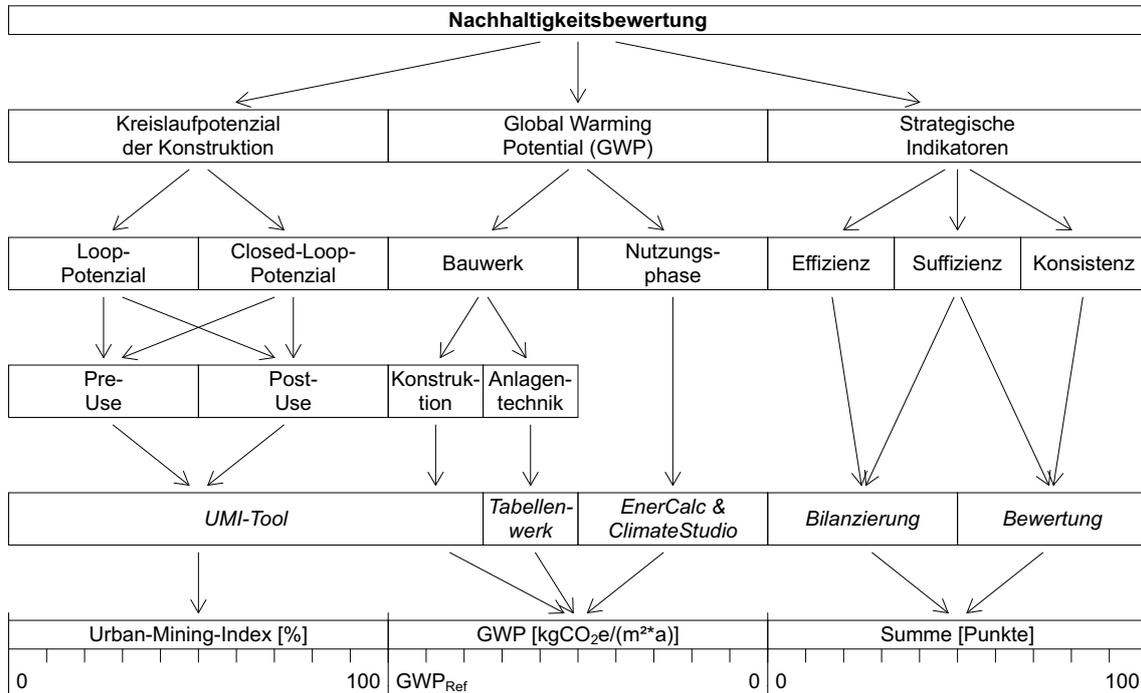


Abbildung 12 Methodische Bewertungsstruktur für die Bewertung der Nachhaltigkeit im Rahmen dieser Arbeit

3.2 Kreislaufpotenzial der Konstruktion

Das Kreislaufpotenzial prognostiziert den Anteil an Materialien und Baustoffen einer Konstruktion, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien in mehr oder weniger geschlossenen Materialkreisläufen geführt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Bewertung des Kreislaufpotenzials der Baukonstruktion das an der Bergischen Universität in Wuppertal von Anja Rosen entwickelte „Urban Mining Index“-Tool (kurz: UMI-Tool) genutzt. Dieses Excel-basierte Tool für die Berechnung des Urban Mining Indicators wurde im Rahmen des Solar Decathlons Europe 22/23 entwickelt. Mit dem Urban Mining Indicator können quantifizierbare Aussagen über das Potenzial des zirkulären Bauens getroffen werden, da das Kreislaufpotenzial nicht nur anhand der verwendeten Materialien und Produkte beurteilt wird, sondern ebenfalls die Rückbaufreundlichkeit der Konstruktion berücksichtigt wird. Durch rückbaufreundliche Konstruktionen und Konstruktionsverbindungen kann ein höherer Urban Mining Indicator erreicht werden. Damit wird der Betrachtungshorizont von den Rohstoffen über die Materialien und Produkte auf die Art der Zusammensetzung Bauteilschichten und die Art der Konstruktionsverbindungen erweitert.

Der Urban Mining Indicator berücksichtigt die Masse der Werkstoffe, den Faktor Arbeit (Rückbaufreundlichkeit), den Faktor des Wertes der Materialien und das Material-Loop-Potential

$$\boxed{\text{Kreislaufpotenzial der Konstruktion}} = \boxed{\text{Masse der Werkstoffe}} \times \boxed{\text{Faktor Arbeit}} \times \boxed{\text{Faktor Wert}} \times \boxed{\text{Material-Loop-Potential}}$$

Abbildung 13 Berechnungsverfahren des Urban-Mining-Indicators des UMI-Tools von Anja Rosen

Dabei wird die Bewertung des Kreislaufpotenziales der Konstruktionen und Materialien des Gebäudes in zwei Kategorien unterteilt:

- **Pre-Use:** Auf dieser Betrachtungsebene wird analysiert, welche Baustoffe einen Anteil aufweisen, der bereits aus einem Kreislauf stammt und für den keine nicht erneuerbaren Primärrohstoffe verwendet werden müssen, die durch Ressourcengewinnung erstmalig einem Stoffkreislauf zugeführt werden. Diese Phase bezieht sich auf den Zeitraum vor der Nutzungsphase des Gebäudes; also auf die Herstellungsphase.
- **Post-Use:** Die Post-Use Betrachtungsebene befindet sich in der zeitlichen Einordnung nach der Nutzungsphase des Gebäudes. Diese Phase beschreibt also das End-of-Life (kurz EoL) Szenario. Die relevanten Kriterien beziehen sich dabei auf die Anteile der Konstruktion, die durch die Materialwahl und die Materialverbindungen erneut einem Stoffkreislauf zugeführt werden können.

In der Nutzungsphase selbst werden zusätzlich die Bauteile berücksichtigt, bei denen der erwartete Lebenszyklus geringer ist, als die erwartete Lebensdauer des Gebäudes.

Auf den beiden zuvor beschriebenen Betrachtungsebenen wird dabei zwischen dem Closed-Loop-Potenzial und dem Loop-Potenzial unterschieden:

- Closed-Loop-Potenzial: Das Closed-Loop-Potenzial beschreibt dabei das Kreislaufpotenzial in geschlossenen Materialkreisläufen. Es beschreibt den Anteil der Materialien in der Baukonstruktion, deren (Stoff-)Kreislauf ohne Qualitätsverlust durch die Möglichkeit der Zuführung in eine neue Nutzung geschlossen werden kann. Dieses Kreislaufszenario ist dabei beliebig oft wiederholbar.
- Loop-Potenzial: Das Loop-Potenzial berücksichtigt zusätzlich noch Materialien, welche im Pre-Use im Vergleich zum Ausgangsmaterial durch eine Weiterverwertung eine geringere Produktqualität aufweisen und im Post-Use lediglich weiterverwertbar (ebenfalls geringere Produktqualität) oder nicht zertifiziert nachhaltig energetisch verwertbar sind.

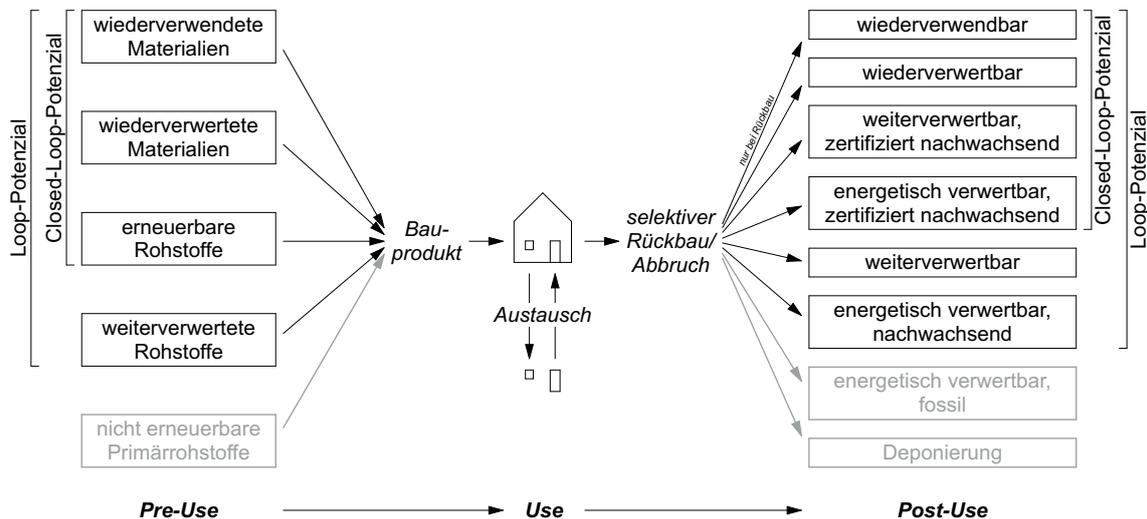


Abbildung 14 Schematischer Aufbau des Loop- und Closed-Loop-Potenzials im Pre- und Post-Use nach Anja Rosen

Der Urban Mining Indicator wird berechnet durch:

$$UMI [\%] = \frac{CLP_{PreUse} + \frac{LP_{PreUse} - CLP_{PreUse}}{2}}{2} + \frac{CLP_{PostUse} + \frac{LP_{PostUse} - CLP_{PostUse}}{2}}{2}$$

dabei ist:

CLP: Closed-Loop-Potenzial [%];

LP: Loop-Potenzial [%].

3.4 Global Warming Potential

Das Global Warming Potential (kurz: „GWP“) wird im Rahmen dieser Arbeit als Summe des GWP's des Bauwerkes (Konstruktion und Anlagentechnik) und dem GWP der Nutzungsphase zum Betrieb des Gebäudes bewertet. Die Bewertung erfolgt in Relation zu dem GWP des Referenzgebäudes in Anlehnung an die DIN 18599. Die Bilanzierungen erfolgen dabei durch das von Markus Lichtmeß an der Bergischen Universität in Wuppertal entwickelte Excel-basierte Tool „EnerCalC“. Bei der Bilanzierung kann durch einen Energieüberschuss durch bereitgestellte Energie durch Photovoltaik in der Theorie auch ein negatives GWP resultieren.

Das zu bewertende GWP ist die Summe aus dem GWP des Bauwerkes (Konstruktion + Anlagentechnik) und der Nutzungsphase. Das GWP wird durch folgende Formel berechnet:

$$GWP [kgCO_2e/m^2a] = GWP_{K,50+AT,50} + GWP_N$$

dabei ist:

- $GWP_{K,50+AT,50}$: Flächenspezifische jährliche Summe des GWP's des Bauwerkes bei einem Lebenszeitraum des Gebäudes von 50 Jahren [kgCO₂e/m²a]
- GWP_N : Flächenspezifische jährliche Summe des GWP's in der Nutzungsphase [kgCO₂e/m²a].

Das GWP des Bauwerkes ist die Summe aus dem GWP der Konstruktion und der Anlagentechnik. Es wird durch folgende Formel berechnet:

$$GWP_{K,50+AT,50} [kgCO_2e/m^2a] = GWP_{K,tot} / n + GWP_{AT,50}$$

dabei ist:

- $GWP_{K,tot}$: Summe des GWP's der Konstruktion [kgCO₂e];
- $GWP_{AT,50}$: Flächenspezifische Summe des GWP's der Anlagentechnik [kgCO₂e/m²];
- n : Prognostizierter Lebenszeitraum des Gebäudes (50 Jahre nach DGNB) [a];
- A : Gebäudenutzfläche [m²].

Das GWP der Nutzungsphase wird durch die CO₂e-Emissionen durch das Heizens und des Strombedarfs berechnet. Es erfolgt eine Gutschrift durch die Strombereitstellung einer Photovoltaikanlage auf der Liegenschaft des Gebäudes. Diese Gutschrift wird berechnet die Menge des bereitgestellten Stroms und dem Emissionsfaktor (vgl. Tabelle im Anhang) des Stroms:

$$GWP_N [kgCO_2/m^2a] = Q_{E,Heiz+DHW} \times f_{CO_2e,Heiz+DHW} + Q_{E,Strom} \times f_{CO_2e,Strom,Netz} - Q_{E,gen,PV} \times f_{CO_2e,Strom,Verdr\u00e4ngung}$$

dabei ist:

- $Q_{E,Heiz+DHW}$: Gebäudebezogener j\u00e4hrlicher fl\u00e4chenspezifischer Endenergiebedarf (Heizen und DHW) durch Berechnungen in Anlehnung das GEG, DIN 18599 [kWh/(m\u00b2a)];
- $f_{CO_2e,Heiz+DHW}$: Emissionsfaktor des Brennstoffes von $Q_{E,Heiz}$ nach GEG [kgCO\u2082e/kWh];
- $Q_{E,Strom}$: fl\u00e4chenspezifischer Endenergiebedarf Strom (Allgemeinstrombedarf, Beleuchtung, L\u00fcftung und Hilfsenergie) [kWh/(m\u00b2a)];
- $f_{CO_2e,Strom,Netz}$: Emissionsfaktor f\u00fcr Strom als Netzbezug nach GEG [560 kgCO\u2082e/kWh];
- $Q_{E,gen,PV}$: Fl\u00e4chenspezifische j\u00e4hrliche Energiebereitstellung durch PV-Anlage auf der Liegenschaft des Geb\u00e4udes [kWh/(m\u00b2a)];
- $f_{CO_2e,Strom,Verdr\u00e4ngung}$: Emissionsfaktor f\u00fcr Strom nach GEG [560 kgCO\u2082e/kWh].

Der fl\u00e4chenspezifische Energiebedarf f\u00fcr Strom setzt sich dabei zusammen aus dem Strombedarf des Allg\u00e4mestrombedarfs, der Beleuchtung, der L\u00fcftung und der Hilfsenergie f\u00fcr die Heizung. Der Allg\u00e4mestrombedarf und der Strombedarf der Beleuchtung wird als Summe aus einem Tabellenwerk der deutschen Energieagentur f\u00fcr typische nutzungsspezifische Fl\u00e4chenverbrauchswerte entnommen (vgl. Tabelle 4, Seite 52). Der Strombedarf f\u00fcr die L\u00fcftung und die Hilfsenergie wird durch EnerCalC bilanziert.

$$Q_{E,Strom} [kWh/(m^2a)] = \sum (Fl\u00e4chenanteil [-] \times Q_{E,Strom,Allg.+Beleuch.}) + Q_{E,Strom,L\u00fcftung} + Q_{E,Strom,Hilfsen.}$$

dabei ist:

- $Q_{E,Strom,Allg.+Beleuch.}$: Summe des fl\u00e4chen- und nutzungsspezifischen Strombedarfs f\u00fcr Allg\u00e4mestrom und Beleuchtung (Quelle: dena) [kWh/(m\u00b2a)];
- $Q_{E,Strom,L\u00fcftung}$: fl\u00e4chenspezifischer Strombedarf der L\u00fcftung [kWh/(m\u00b2a)];
- $Q_{E,Strom,Hilfsen.}$: fl\u00e4chenspezifischer Strombedarf f\u00fcr die Hilfsenergie der Heizungsanlage [kWh/(m\u00b2a)].

F\u00fcr die Bilanzierung der Energiebereitstellung wird das Tool „ClimateStudio“ von Solema als Rhino-Plugin verwendet, welches an der Harvard University entwickelt wurde. Aus ClimateStudio kann die j\u00e4hrlich kumulierte solare Einstrahlung unter der Verwendung eines Wetterdatensatzes und unter der Ber\u00fccksichtigung von Ausrichtung und Verschattung ausgegeben werden. Durch die folgende Formel wird im Rahmen dieser Arbeit die Energiebereitstellung auf der Liegenschaft des Geb\u00e4udes durch Photovoltaik hergeleitet:

$$Q_{E,gen,PV} [kWh/m^2a] = Q_{SolarRadiation} \times \eta \times \varphi / A$$

dabei ist:

- $Q_{SolarRadiation}$: Solare Einstrahlung auf die gesamte Modulfläche [kWh/a];
 η : Wirkungsgrad der Photovoltaikmodule [20 %];
 φ : Performance Ratio [80 %];
 A : Gebäudenutzfläche [m²].

Das GWP des Referenzgebäudes wird ebenfalls durch die Summe des GWP's des Bauwerks und der Nutzungsphase berechnet. Die Formel zur Berechnung lautet:

$$GWP_{Ref} [kgCO_2e/m^2a] = GWP_{Ref,K,50+AT,50} + GWP_{Ref,N}$$

dabei ist:

- $GWP_{Ref,K,50+AT,50}$: Flächenspezifische jährliche Summe des GWP's des Bauwerks des Referenzgebäudes bei einem Lebenszeitraum des Gebäudes von 50 Jahren [kgCO₂e/m²a]
 $GWP_{Ref,N}$: Flächenspezifische jährliche Summe des GWP's des Referenzgebäudes in der Nutzungsphase [kgCO₂e/m²a].

Das GWP des Bauwerks des Referenzgebäudes ist die Summe aus dem Referenzwert des GWP's der Konstruktion der DGNB und dem GWP der Anlagentechnik analog des GWP's der Anlagentechnik des Bilanzierungsgebäudes ohne die Berücksichtigung des GWP's der Photovoltaik:

$$GWP_{Ref,K,50+AT,50} [kgCO_2e/m^2a] = GWP_{Ref,K,50} + GWP_{Ref,AT} / n$$

dabei ist:

- $GWP_{Ref,K,50}$: DGNB Referenzwert des GWP's der Konstruktion [9,4 kgCO₂e/m²a];
 $GWP_{Ref,AT}$: GWP der Anlagentechnik des Referenzgebäudes nach GEG [kgCO₂e/m²];
 n : Prognostizierter Lebenszeitraum des Gebäudes (50 Jahre nach DGNB) [a]

Das GWP der Nutzungsphase des Referenzgebäudes wird ebenfalls durch die CO₂e-Emissionen durch das Heizen und des Strombedarfs berechnet. Im Gegensatz zu dem Bilanzierungsgebäude erfolgt keine Gutschrift durch die Energiebereitstellung der Photovoltaik. Die Formel zur Berechnung lautet:

$$GWP_{Ref,N} [kgCO_2e/m^2a] = Q_{Ref,E,Heiz+DHW} \times f_{CO2e,Ref,Heiz+DHW} + Q_{E,Strom} \times f_{CO2e,Strom,Netz}$$

dabei ist:

- $Q_{Ref,E,Heiz+DHW}$: Gebäudebezogener jährlicher flächenspezifischer Endenergiebedarf (Heizen und DHW) des Referenzgebäudes in Anlehnung an die DIN 18599 [kWh/(m²a)];

$f_{CO_2e,Heiz+DHW}$:	Emissionsfaktor des Brennstoffes von $Q_{Ref,E,Heiz}$ des Referenzgebäudes nach GEG [kgCO ₂ e/kWh];
$Q_{E,Strom}$:	Nicht-gebäudebezogener jährlicher flächenspezifischer Endenergiebedarf [kWh/(m ² a)];
$f_{CO_2e,Strom,Netz}$:	Emissionsfaktor für Strom als Netzbezug nach GEG [560 kgCO ₂ e/kWh].

Der flächenspezifische Energiebedarf für Strom des Referenzgebäudes setzt sich dabei zusammen aus dem Strombedarf des Allgemeinstrombedarfs, der Beleuchtung, der Lüftung und der Hilfsenergie für die Heizung. Der Allgemeinstrombedarf und der Strombedarf der Beleuchtung wird ebenfalls als Summe aus einem Tabellenwerk der deutschen Energieagentur für typische nutzungsspezifische Flächenverbrauchswerte entnommen. Daher ist die Summe des Allgemeinstrombedarfes und der Strombedarf der Beleuchtung des Referenzgebäudes gleich hoch wie der Bedarf des Bilanzierungsgebäudes. Der Strombedarf für die Lüftung und die Hilfsenergie wird durch EnerCalC berechnet und unterscheidet sich von dem Strombedarf für die Lüftung und die Hilfsenergie des Bilanzierungsgebäudes.

$$Q_{E,Strom,Ref} \text{ [kWh/(m}^2\text{a)]} = \sum (\text{Flächenanteil [-]} \times Q_{E,Strom,Allg.+Beleuch.}) + Q_{E,Strom,Lüft.,Ref} + Q_{E,Strom,Hilfsen.,Ref}$$

dabei ist:

$Q_{E,Strom,Allg.+Beleuch.}$:	Summe des flächen- und nutzungsspezifischen Strombedarfs für Allgemeinstrom und Beleuchtung (Quelle: dena) [kWh/(m ² a)];
$Q_{E,Strom,Lüftung,Ref}$:	flächenspezifischer Strombedarf der Lüftung des Referenzgebäudes [kWh/(m ² a)];
$Q_{E,Strom,Hilfsen.,Ref}$:	flächenspezifischer Strombedarf für die Hilfsenergie der Heizungsanlage des Referenzgebäudes [kWh/(m ² a)].

Die Einordnung der Wirkleistung des GWP's des Bilanzierungsgebäudes steht also in Relation zu dem GWP des Referenzgebäudes und hat demnach keine absoluten Grenzwerte.

Die Bezugsfläche des GWP's und die Energiebezugsfläche der energetischen Bilanzierung ist die nutzbare Nettogrundfläche (Energiebezugsfläche). Da die Fläche des Parkhauses und die Freifläche in der Erdgeschosszone sich außerhalb der thermischen Gebäudehülle befindet, werden diese Flächen in der energetischen Bilanzierung nicht berücksichtigt und diese Flächen werden nicht als nutzbare Nettogrundfläche gewertet. Das GWP für die Herstellung der Untergeschosse wird jedoch in der Berechnung des GWP's der Konstruktion mit einbezogen.

3.5 Strategische Indikatoren

Wenn bei einer Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit nur das Kreislaufpotenzial der Konstruktion und das Global Warming Potential bewertet werden, würden weitere relevante Indikatoren unberücksichtigt bleiben. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich in Anlehnung der Bewertungskriterien des Zertifizierungssystems der DGNB weitere relevante strategische Indikatoren bewertet, die nicht durch die bereits zuvor erläuterten Bewertungsverfahren abgedeckt wurden. Diese strategischen Indikatoren lassen sich auf der Bewertungsebene der Effizienz, Suffizienz und Konsistenz zuordnen. Es werden Bewertungsindikatoren der Flächeneffizienz, der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit, der Flächeninanspruchnahme, der Mobilitätsinfrastruktur und die Biodiversität in Anlehnung an das DGNB-Zertifizierungssystem bewertet.

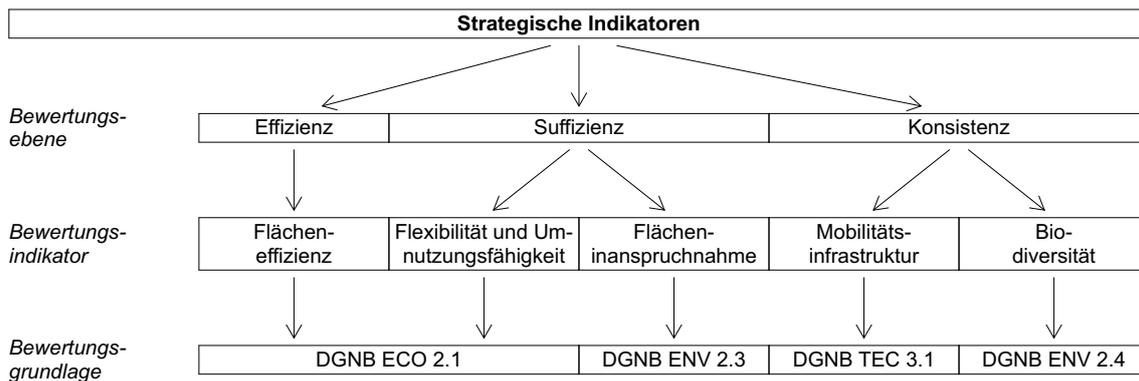


Abbildung 38 Bewertungsschema der strategischen Indikatoren, eigene Darstellung

Um eine Wirkabschätzung vornehmen zu können, erfolgt die Bewertung der Nachhaltigkeit mit Bezug auf die oben dargestellten strategischen Indikatoren aus der Sachbilanz in Form von einer erreichbaren Prozentpunktzahl für jeden Bewertungsindikator. Für jeden Bewertungsindikator können maximal 20 Prozentpunkte erreicht werden, kumuliert können maximal 100 Prozentpunkte erreicht werden. In Abhängigkeit des jeweiligen Bewertungsindikators wird die Wirkabschätzung bilanziert oder durch einen Fragenkatalog bewertet.

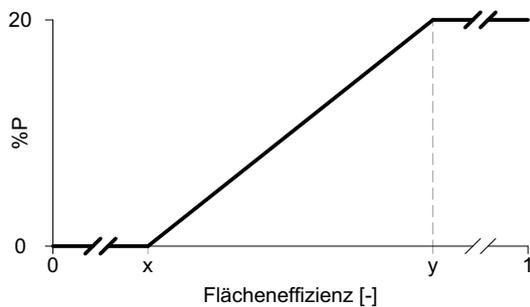
3.5.1 Flächeneffizienz

Das Ziel der Flächeneffizienz ist es, dass die Flächen von geplanten Gebäuden möglichst effizient genutzt werden können. Angestrebt wird ein hohes Verhältnis der nutzbaren Fläche zur Gesamtläche des Gebäudes. Dabei wird der flächenbezogene Effizienzwert, also das Verhältnis der nutzbaren Fläche gegenüber der BGF, bewertet. Es ist zwischen verschiedenen Nutzungen des Gebäudes zu unterscheiden.

Die Bewertung der Flächeneffizienz erfolgt durch ein Bilanzierungsverfahren in Anlehnung an den Kriterienkatalog „ECO 2.1 / Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit“ des DGNB Zertifizierungssystems. Die Flächeninanspruchnahme wird durch folgende Formel bilanziert::

$$\text{Flächeneffizienz [-]} = \text{nutzbare Fläche [m}^2\text{]} / \text{BGF [m}^2\text{]}$$

Der Abbildung 16 ist die Bewertung der Flächeneffizienz in Anlehnung an den Kriterienkatalog der DGNB zu entnehmen. Der Tabelle 2 sind die Faktoren zur Bewertung der Flächeneffizienz in Abhängigkeit der Nutzung und in Anlehnung an den Kriterienkatalog der DGNB zu entnehmen.



Nutzung	x	y
Büro	0,48	0,75
Bildung	0,48	0,75
Hotel	0,43	0,7
Wohnen	0,6	0,8
Verbrauchermarkt	0,7	0,9
Shopping Center Kat. 1	0,55	0,65
Shopping Center Kat. 2	0,5	0,6
Geschäftshaus	0,5	0,7
Gesundheitsbauten	0,47	0,56

Abbildung 16 Flächeneffizienz nach DGNB ECO2.1

Tabelle 2 Faktoren zur Bewertung der Flächeneffizienz

3.5.2 Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit

Das Ziel dieses Indikators ist es, das Bilanzierungsgebäude so zu entwerfen, dass es ein hohes Maß an Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit aufweist. Ein hohes Maß an Umnutzungsfähigkeit und Flexibilität vermeiden das Risiko eines Leerstandes und tragen langfristig zur Akzeptanz des Nutzers, zur Verlängerung der Lebensdauer und zur Reduzierung der Lebenszykluskosten einer Immobilie bei.

Die Bewertung der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit erfolgt durch ein Bewertungsverfahren in Form eines Fragenkataloges in Anlehnung an den Kriterienkatalog „ECO2.1 Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit“ des DGNB Zertifizierungssystems.

• Weitestgehende Vermeidung tragender Innenwände	<input type="checkbox"/> Ja [+5 %P]	<input type="checkbox"/> Nein
• Trennwände können an jeder Fassadenachse des Grundrasters ohne Eingriff in Boden oder Decke eingebaut werden	<input type="checkbox"/> Ja [+5 %P]	<input type="checkbox"/> Nein
• Wände innerhalb einer vorgegebenen Struktur lassen Anpassung unterschiedlicher Grundrissangebote je nach Nachfrage zu	<input type="checkbox"/> Ja [+5 %P]	<input type="checkbox"/> Nein
• Der Großteil der Leitungsstränge der technischen Gebäudeausrüstung ist ohne Abbrucharbeiten erreichbar	<input type="checkbox"/> Ja [+5%P]	<input type="checkbox"/> Nein

Abbildung 17 Fragenkatalog zur Bewertung der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit in Anlehnung an den Kriterienkatalog ECO2.1 der DGNB

3.5.3 Flächeninanspruchnahme

Das Ziel ist die Verringerung der zusätzlichen Inanspruchnahme von Flächen für bauliche Nutzungen und die Begrenzung der Bodenversiegelung nicht bebauter Flächen. Auf lokaler Ebene kann ein schonender Umgang mit Flächen zu einer Verbesserung des Mikroklimas führen.

Die Bewertung der Flächeninanspruchnahme erfolgt durch ein Bilanzierungsverfahren in Anlehnung an den Kriterienkatalog „ENV2.3 Flächeninanspruchnahme“ des DGNB Zertifizierungssystems. Die Flächeninanspruchnahme wird durch folgende Formel bilanziert:

$$\text{Flächeninanspruchnahme [-]} = 1 - \text{neu versiegelte Fläche [m}^2\text{]} / \text{Gebäudenutzfläche [m}^2\text{]}$$

Der Abbildung 18 ist die Bewertung der Flächeninanspruchnahme in Anlehnung an den Kriterienkatalog der DGNB zu entnehmen.

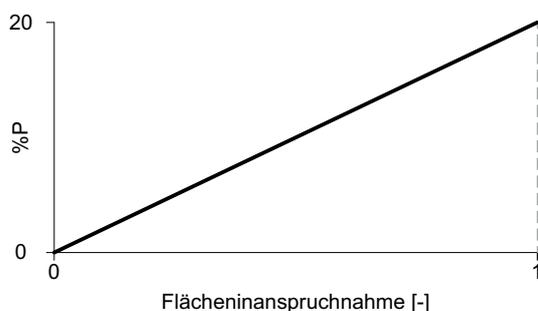


Abbildung 18 Bewertung der Flächeninanspruchnahme in Anlehnung an den Kriterienkatalog ENV2.3 der DGNB

3.5.4 Mobilitätsinfrastruktur

Das Ziel des Indikators der Mobilitätsinfrastruktur ist die Einsparung natürlicher Ressourcen, die Reduktion von verkehrsbedingten Emissionen in Luft, Wasser und Boden, die Steigerung des Nutzerkomforts durch eine nachhaltige Mobilitätsinfrastruktur und die Stärkung leistungsfähiger, bezahlbarer Mobilitätsangebote. Eine nachhaltige und intelligente Verkehrsinfrastruktur ermöglicht es den Nutzern, das für ihre individuellen Ansprüche geeignetste Verkehrsmittel zu wählen. Werden am Gebäude die Voraussetzungen geschaffen, vielfältige Mobilitätsangebote zu nutzen, ist von einer Reduktion der Schadstoffbelastungen und weiteren negativen Auswirkungen, die durch üblicherweise motorisierten Individualverkehr entstehen, auszugehen.

Die Bewertung der Mobilitätsinfrastruktur erfolgt durch ein Bewertungsverfahren in Form eines Fragenkataloges in Anlehnung an den Kriterienkatalog „TEC3.1 Mobilitätsinfrastruktur“ des DGNB Zertifizierungssystems.

- | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------|
| • Klar dem Gebäude zugeordnete Abstellanlagen für Fahrräder gut zugänglich am oder im Gebäude vorhanden | <input type="checkbox"/> Ja [+5 %P] | <input type="checkbox"/> Nein |
| • Stellplätze für Mobilitäts-Sharing (Car-, Roller-, Bike-Sharing etc.) in unmittelbarer Nähe vorhanden | <input type="checkbox"/> Ja [+5 %P] | <input type="checkbox"/> Nein |
| • Gute Anbindung an den örtlichen ÖPNV gewährleistet durch die Standortwahl des Gebäudes | <input type="checkbox"/> Ja [+5 %P] | <input type="checkbox"/> Nein |
| • Ausreichend Ladeinfrastruktur für den elektrifizierten Individualverkehr vorhanden | <input type="checkbox"/> Ja [+5 %P] | <input type="checkbox"/> Nein |

Abbildung 19 Fragenkatalog zur Bewertung der Mobilitätsinfrastruktur in Anlehnung an den Kriterienkatalog TEC3.1 der DGNB

3.5.5 Biodiversität

Das Ziel einer hohen Biodiversität ist die Erhaltung biologischer Vielfalt im lokalen Kontext. Durch einen Aufbau, einen Erhalt oder eine Erweiterung der biologischen Vielfalt direkt an Gebäuden und deren anliegenden Außenflächen steigert die Biodiversität am Standort des Gebäudes. Die Bewertung der Biodiversität erfolgt durch ein Bilanzierungsverfahren in Anlehnung an den Kriterienkatalog „ENV2.4 Biodiversität am Standort“ des DGNB Zertifizierungssystems. Der objektbezogene Biotopflächenfaktor wird durch folgende Formel bilanziert:

$$\text{Objektbezogener Biotopflächenfaktor [-]} = \frac{\sum (\text{Teilflächen [m}^2\text{]} \times \text{spez. Biotopflächenfaktoren [-]})}{\text{Grundstücksfläche [m}^2\text{]}}$$

Der Abbildung 20 ist die Bewertung des objektbezogenen Biotopenflächenfaktors in Anlehnung an den Kriterienkatalog der DGNB zu entnehmen. Der Tabelle 3 sind die spezifischen Biotopflächenfaktoren zur Berechnung des objektbezogenen Biotopenflächenfaktors in Anlehnung an den Kriterienkatalog der DGNB zu entnehmen.

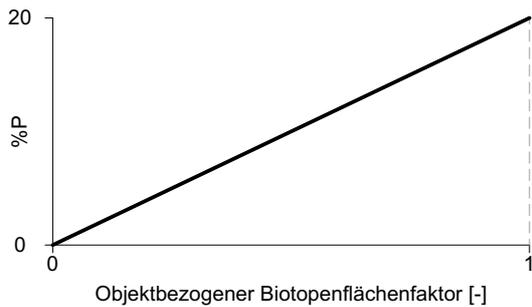


Abbildung 20 Bewertung des objektbezogenen Biotopenflächenfaktors in Anlehnung an DGNB ENV2.4

Bezeichnung	Faktor
Versiegelte Flächen	0
Teilversiegelte Flächen	0,3
Halboffene Flächen	0,5
Vegetationsflächen, < 80 cm Bodenauftrag	0,5
Vegetationsflächen, > 80 cm Bodenauftrag	0,7
Vegetationsflächen, anstehender Boden	1,0
Dachbegrünung	0,7
Vertikalbegrünung	0,5
Regenwasserversickerung	0,2

Tabelle 3 spezifische Biotopflächenfaktoren zur Bewertung des objektbezogenen Biotopenflächenfaktors

3.6 Ergebnisdarstellung

Alle für die Bewertung relevanten Parameter werden für jede Konstruktionsvariante in einer separaten Exceltabelle eingetragen, die nach vollständiger Angabe dieser Parameter diverse Abbildungen als Darstellung der Ergebnisse ausgibt. Ein Screenshot der Eingabeoberfläche dieses Tools am Beispiel der Konstruktionsvariante 1 ist im Anhang dieser Arbeit zu finden.

Die Ergebnisdarstellung der Wirkabschätzung der drei zuvor beschriebenen Bewertungsindikatoren (Kreislaufpotenzial der Konstruktion, Global Warming Potential und die strategischen Indikatoren) erfolgt zunächst in einer separaten Betrachtung.

Die Darstellung der Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der drei Konstruktionsvarianten wird unterteilt in die Bauteilgruppen der untersten Geschossdecke, der Außenwände, der Innenwände, des Geschossdecken, des Daches und der Fenster. Durch Kreisdiagramme aus dem UMI Tool wird das Kreislaufpotenzial unterteilt in dem Closed-Loop-Potential und dem Loop-Potential aufgezeigt.

Die Darstellung der Ergebnisse des GWP's der drei Konstruktionsvarianten und des Referenzgebäudes erfolgt anhand von Balkendiagrammen. Dabei wird die Darstellung der Ergebnisse unterteilt in das GWP der Konstruktion, das GWP der Anlagentechnik und das GWP der Nutzungs-

phase durch den Energiebedarf (Heizen, Aufbereitung Trinkwarmwasser, Allgemeinstrombedarf [Beleuchtung und Einsteckgeräte], Hilfsenergie, Lüftung und die Energiebereitstellung durch die Photovoltaik auf der Liegenschaft des Bilanzierungsgebäudes).

Die Darstellung der Ergebnisse der strategischen Indikatoren erfolgt ebenfalls durch ein Balkendiagramm, welches für jede Konstruktionsvariante in Flächeneffizienz, die Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit, die Flächeninanspruchnahme, die Mobilitätsinfrastruktur und in die Biodiversität unterteilt.

Anschließend werden die Ergebnisse von allen Konstruktionsvarianten in einem gemeinsamen Netzdiagramm dargestellt. Die Achse des Kreislaufpotenzials reicht dabei von 0% bis 100%; die Achse des GWP's reicht von dem GWP des Referenzgebäudes bis zu 0 kgCO₂e/m²EBFa und die Achse für die strategischen Indikatoren reicht ebenfalls von 0% bis 100%. Ein hohes Maß an Nachhaltigkeit wird dabei von einer Konstruktionsvariante erreicht, wenn die Einordnung dieser Indikatoren möglichst weit außen des Netzdiagramms erfolgt.

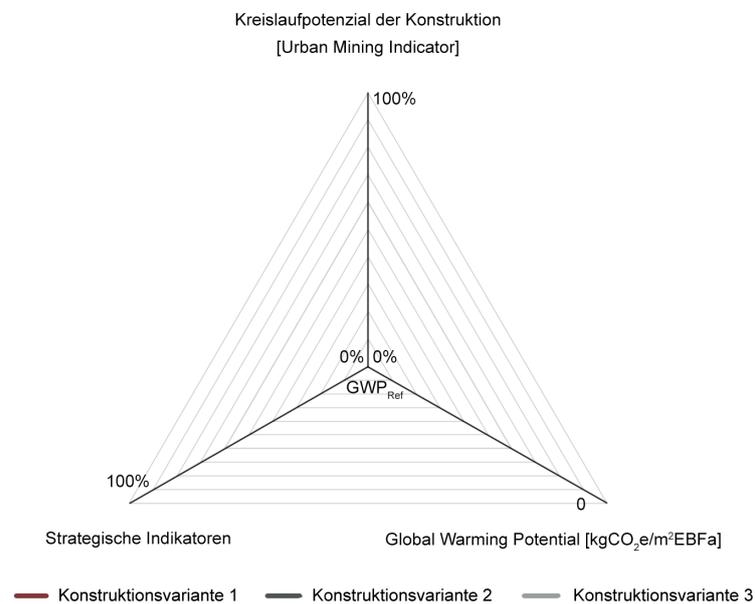


Abbildung 21 Netzdiagramm der Ergebnisdarstellung, eigene Darstellung

4 Entwurf

4.1 Grundstück und Bestand

Das Grundstück des Entwurfes befindet sich in Düsseldorf in direkter Anbindung an den Carlsplatz. Dieser Platz ist durch den temporären Lebensmittelmarkt bekannt und bildet städtebaulich eine zentrale Fläche aus. Auf dem Entwurfsgrundstück befindet sich derzeit ein Gebäude, welches in den 1960er Jahren erbaut wurde und derzeit wesentlich als Parkhaus genutzt wird. In den beiden Untergeschossen befinden sich Parkplätze in einer Langzeitvermietung. In der Erdgeschosszone befindet sich ein Lebensmittelmarkt und ein Bekleidungsgeschäft. In den fünf Obergeschossen befinden sich gebührenpflichtige Kurzzeitparkplätze. Dieses Bestandsgebäude ist geprägt von der gerasterten und gefalteten Fassade, welche durch Betonfertigteile sechseckige Öffnungen ausbildet. Das Gebäude wurde in Skelettbauweise mit Massivfertigtecken aus Stahlbeton errichtet.

Auf dem Grundstück soll ein neues Gebäude mit einer Mischnutzung aus Wohnungen, einer Gastronomie, Co-Working-Spaces und einem Fitnessstudio entstehen. Ziel des Entwurfes war der maximale Erhalt der bereits gebauten Strukturen des Bestandes. Die Herausforderungen dabei lagen in der Belichtung des Gebäudes bei einer Bautiefe von ca. 37 Meter. Die lichte Raumhöhe des Bestandes beträgt 2,55 Meter. Die Konstruktion des Entwurfes sollte weitestgehend wärmebrückenfrei erfolgen.

Der Marktplatz nördlich des Gebäudes wird ebenfalls neu entworfen. Die Ökobilanzierung bezieht sich jedoch nur auf das Gebäude und nicht auf die Gestaltung des Außenraumes außerhalb der Grundstücksgrenze des Gebäudes.

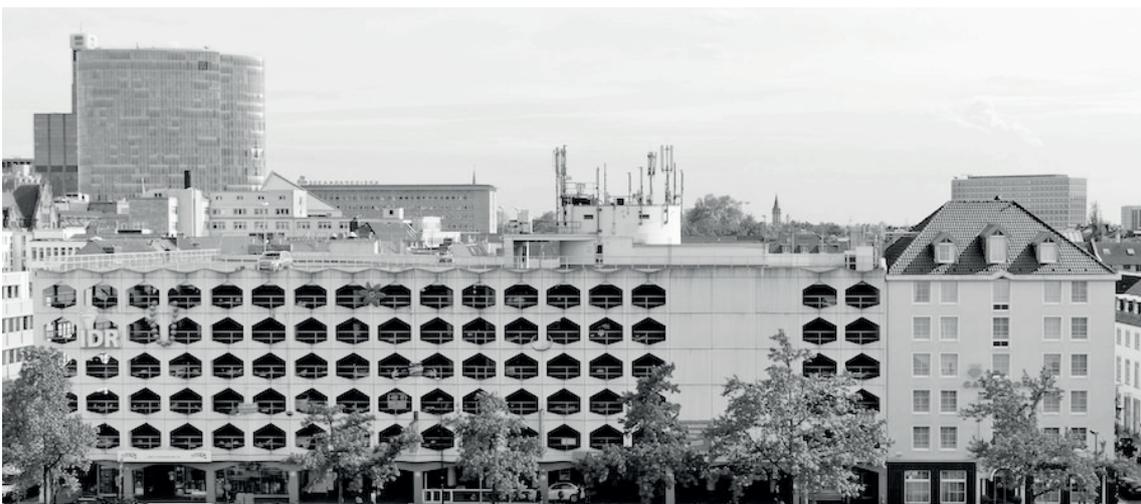


Abbildung 22 Foto vom Bestandsgebäude, Quelle: <https://www.carlsplatz-markt.de/der-markt> [Zugriff am 19.01.2024]

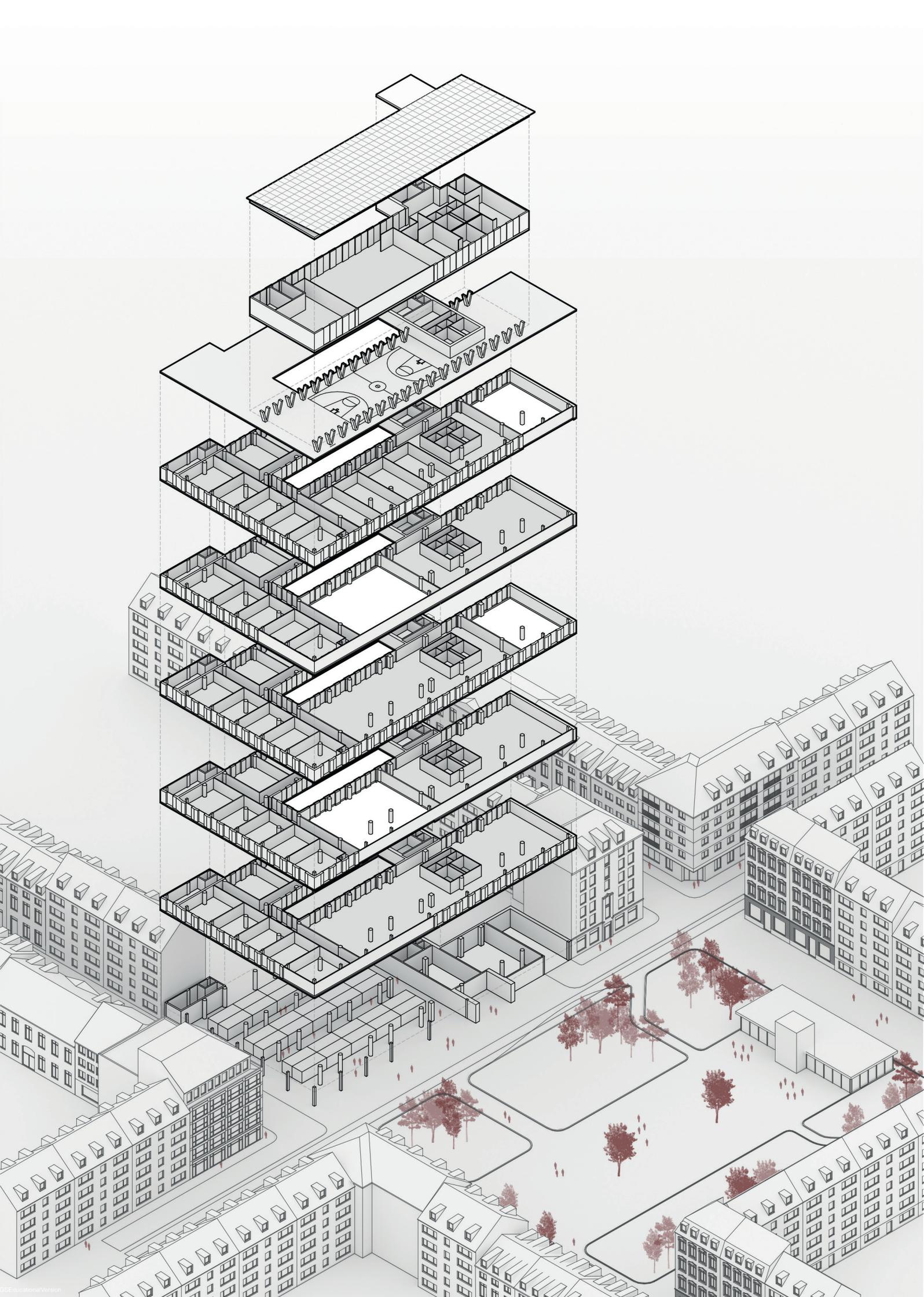
4.2 Entwurfsdarstellung

Der temporäre Markt wird in die Erdgeschosszone des Bestandsgebäudes verlegt. Dieser Bereich bleibt dauerhaft geöffnet und befindet sich dadurch nicht in der thermischen Gebäudehülle. Durch die Verlegung des Marktes entsteht ein attraktiver Platz, der von der umliegenden Gastronomie mit diversen Angeboten bespielt werden kann.

Für eine der neuen Nutzung entsprechend angemessenen Belichtung im Innenraum des Gebäudes wird durch einen selektiven Rückbau der Betonelemente der Geschossdecken ein Belichtungshof geschaffen.



Abbildung 23 Lageplan der Transformation M 1:1250, eigene Darstellung



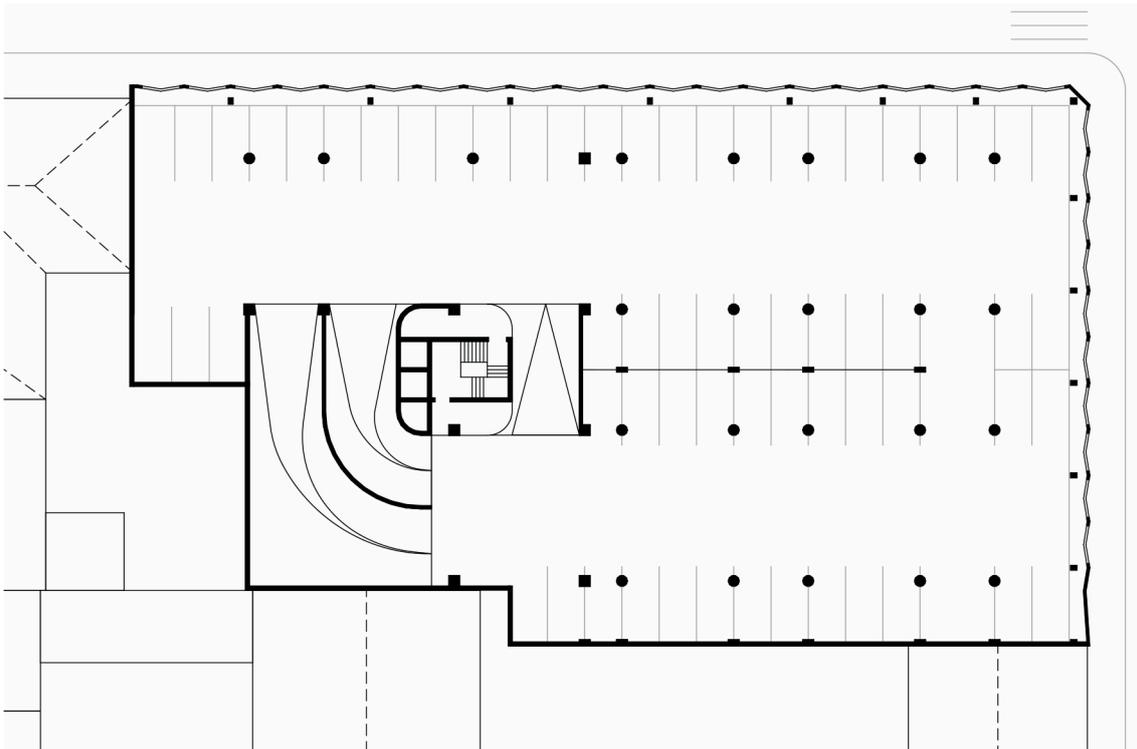


Abbildung 25 Grundriss 1. Obergeschoss Bestand M 1:500, eigene Darstellung

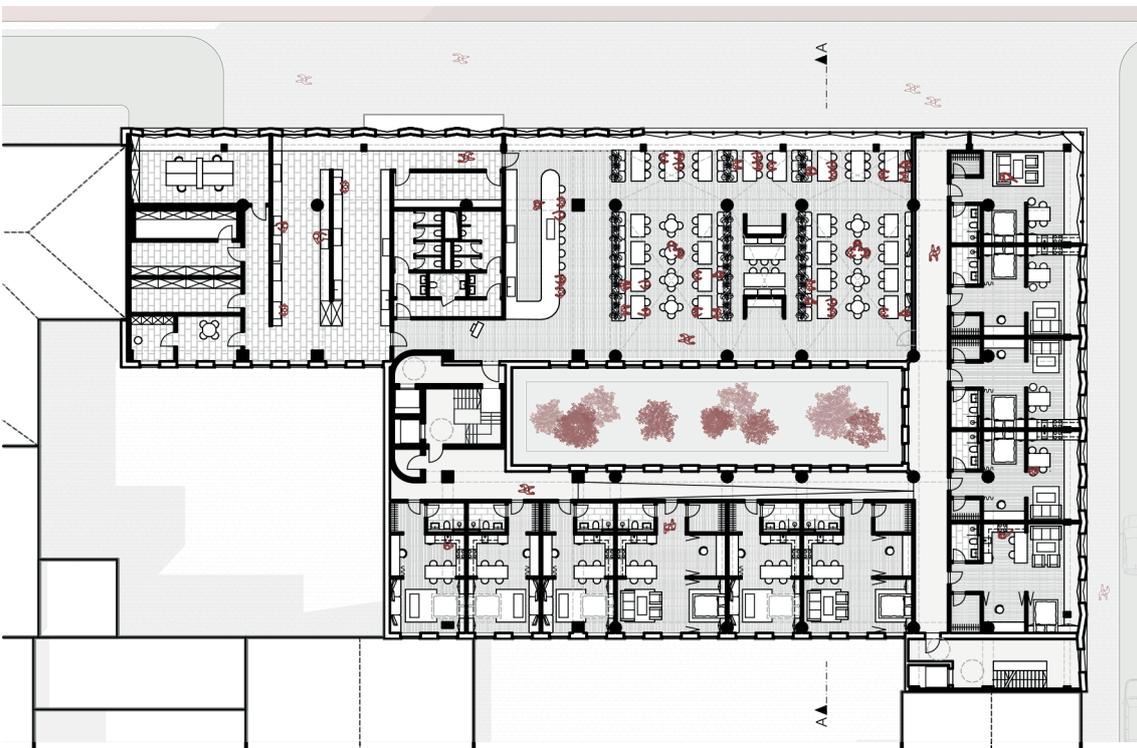


Abbildung 26 Grundriss 1. Obergeschoss Transformation M 1:500, eigene Darstellung

Außerdem werden im Innenraum Betonelemente selektiv rückgebaut, um das Gebäude besser belichten und belüften zu können und um die lichte Raumhöhe der neuen Nutzung anzupassen. Dieser selektive Rückbau erfolgt dabei nur in dem dafür mindest notwendigen Maß. Der restliche Gebäudebestand soll dabei in einem hohen Maß weitergenutzt werden, um Ressourcen zu schonen und Emissionen zu vermeiden.

Da die Auffahrtsrampen in keine neue Nutzung überführt werden können, werden diese ebenfalls rückgebaut. Außerdem befindet sich an dem Bestandsgebäude auf der Südseite zum Innenhof der Blockrandbebauung eine tragende und geschlossene massive Wand, welche für eine neue Nutzung mit hoher Qualität ebenfalls zurück gebaut werden muss.

Der Treppenraum inklusive der beiden Aufzugsschächte bleiben aus dem Bestand erhalten. Aufgrund von brandschutztechnischen Vorgaben entsteht ein neuer Treppenraum an der Südseite des Gebäudes.

Im ersten Obergeschoss befindet sich an der Nordfassade der Transformation eine Gastronomie, welche die Lebensmittel des Marktes aus der Erdgeschosszone des neuen Gebäudeentwurfes direkt weiterverarbeitet. Über der Gastronomie befinden sich Co-Working-Spaces. Diese Co-Working-Spaces wurden dabei so entworfen, dass diese den neuen Bedarf des sich wandelnden Arbeitsmarktes, welchen es mehr Menschen ermöglicht, aus dem Remote aus zu arbeiten, decken können. Offene Grundrisse sollen dabei Agglomerationseffekte stärken. Zeitgleich gibt es abgrenzbare Besprechungsräume und mehrere über die Etagen verteilte Konferenzzellen, um ohne Störungseffekte Telefonate und Videokonferenzen abhalten zu können.

Auf der Ost- und Südseite des Gebäudes entstehen in dem ersten bis zum fünften Obergeschoss neue Wohneinheiten. Diese Wohneinheiten wurden mit 35 bis 45 m² Wohnfläche je Wohneinheit bewusst klein entworfen, um durch eine höhere Suffizienz ökologische Zielsetzungen erreichen zu können. Durch Raumteiler in Form von fest installierten Faltschleusen können in jeder Wohneinheit Arbeits- und Schlafräume hinzugeschaltet oder abgetrennt werden.

Auf dem Dach des Gebäudes befinden sich Grünbereiche für Urban-Gardening Projekte der Bewohner und Bewohnerinnen. Außerdem befindet sich auf dem Dach der Transformation ein Sportfeld. Dieses Sportfeld wird von einer aufgeständerten und eingeschossigen Aufstockung überdacht. In dieser Aufstockung befindet sich ein Fitnessstudio mit Kursraum.

Die Fassade des Gebäudes besteht an den Außenseiten aus weißen Streckmetall-Schiebläden, welche als Sonnen- und Sichtschutz fungieren. Die Faltung der Bestandsfassade an der Nord- und Ostfassade wurde dabei mit in den neuen Fassadenentwurf aufgenommen.

Auf der Aufstockung sitzt ein Flugdach aus Photovoltaikmodulen mit leichter Südneigung auf. Durch die Flugdachsituation erfährt das Gebäude einen horizontalen Abschluss und die Fläche der Photovoltaikanlage kann dadurch größer dimensioniert werden.

In den beiden Untergeschossen befindet sich ein Mobility-Hub für die Gebäudenutzer.

Das Gebäude ist der Gebäudeklasse 5 zuzuordnen. Die Oberkante des Bodens der obersten Etage liegt mit einer Höhe von in etwa 21,8 Meter unter der Hochhausgrenze von 22 Meter.

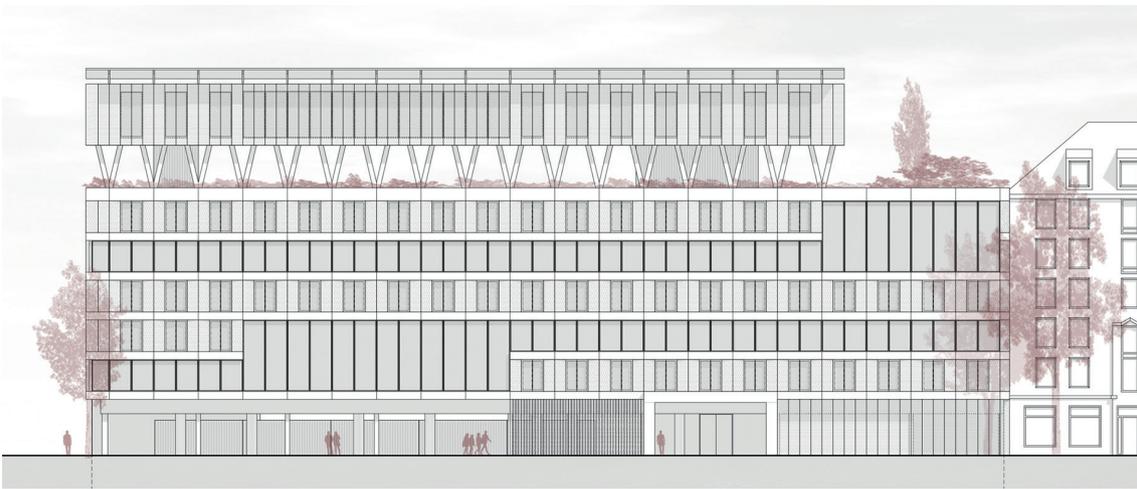


Abbildung 27 Ansicht Nord der Transformation M 1:500, eigene Darstellung



Abbildung 28 Schnitt AA der Transformation M 1:500, eigene Darstellung

4.3 Konstruktion

Wie in der Beschreibung der Methodik bereits erwähnt werden drei unterschiedliche Konstruktionsvarianten untersucht. Der Entwurf bleibt dabei unverändert, um ein hohes Maß an Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Aus gleichem Grund wurden die Außenbauteile der Konstruktionsvarianten so konstruiert, dass die jeweilige Bauteilgruppe der verschiedenen Konstruktionen den gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten hat. Die Berechnungen sind im Anhang zu finden.

4.3.1 Konstruktionsvariante 1

Bei der ersten Konstruktionsvariante wird der Bestand als Grundlage für die Transformation genutzt. Die Transformation erfolgt durch einen Ausbau der bereits vorhandenen Strukturen.

Das Tragwerk der untersten Geschossdecke über dem Markt bilden die Betonelemente des Bestandes. Diese werden mit einer Mineralfaserdämmung mit einem Schmelzpunkt von über 1000 °C von unten gedämmt, um die Brandschutzvorgaben in diesem Bereich einhalten zu können. Die Dämmplatten werden durch ein Halterungssystem aus Aluminium unter der Decke befestigt und von nicht brennbaren und weiß gestrichenen Sauerkrautplatten in Position gehalten. Auf der Innenseite der untersten Geschossdecke werden Holzfaserdämmplatten mit integrierten Heizschleifen verlegt. Auf diesem System erfolgt die Installation von Holzmassivdielen.

Der Aufbau der Zwischengeschossdecken ist analog zu dem Aufbau der untersten Geschossdecke, jedoch nur ohne Dämmschicht.

Die Außenwände werden in Elementen seriell vorproduziert und vor Ort nur an der Außenseite des Gebäudes befestigt. Dafür werden die Fertigbetonteile der Fassade im Bestand rückgebaut. Die Holzelemente bestehen aus massiven Brettschichtholzelementen aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft. Da diese Elemente nicht lastabtragend sind, kann eine Holzfaserdämmung verwendet werden. Geschossweise Brandriegel gewähren dabei die Einhaltung der Brandschutzvorgaben. Die Fassade besteht aus wiederverwendetem Wellblech aus Aluminium und Schiebeelementen aus Streckmetall. Das wiederverwendete Wellblech kann bei einem Händler für zirkuläres Bauen erworben werden. Ein Screenshot des angebotenen Materials befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

Die Innenwände werden durch ein Holzständerwerk realisiert, welches mit Lehmbauplatten beplankt und mit Lehmputz verputzt werden. Da Lehmbauplatten der Baustoffklasse A1 - nicht brennbar - zugeordnet werden, können die Brandschutzvorgaben dadurch eingehalten werden. Die Innenwände des Treppenhauses im Bestand werden weiterhin genutzt.

Das Dach wird mit Schaumglasplatten gedämmt. Es wird ein Gründach installiert.

Die Aufstockung dieser Konstruktionsvariante erfolgt in Holzbauweise.

4.3.2 Konstruktionsvariante 2

Für die Errichtung des Gebäudes in der zweiten Konstruktionsvariante wird der gesamte Bestand abgebrochen. Die beiden Untergeschosse werden durch eine Stahlbetonkonstruktion mit einem Recyclinganteil von 35 % errichtet. Das restliche Gebäude wird in Holzbauweise auf die Stahlbetonkonstruktion der Tiefgarage aufgesetzt.

Das Tragwerk der untersten Geschossdecke bildet eine Holzmassivdecke aus Brettschichtholz. Analog zu der ersten Konstruktion werden Mineralfaserdämmplatten mit einem Schmelzpunkt von über 1000 °C mit einer Aluminiumkonstruktion an der Unterseite der untersten Geschossdecke (über dem Markt) angebracht.

Die Geschossdecken werden ebenfalls mit einer Holzmassivdecke aus Brettschichtholz konstruiert. Auf dieser Decke liegt eine 4 cm starke Holzfaserdämmplatte als Trittschalldämmung mit integrierten Heizschleifen auf. Der Oberfußboden besteht aus Holzmassivdielen.

Das Primärtragwerk dieser Konstruktion besteht aus Holzstützen. Tragende Innen- und Außenwände werden weitestgehend vermieden. Daher können auch bei dieser Konstruktion nicht tragende Holzkonstruktionen als Außenwand eingesetzt werden, welche in dieser Konstruktionsvariante mit einer unbehandelten Lärchenholzfassade beplankt werden. Da die Außenwände nur die Eigenlasten abtragen werden die Vorgaben des Brandschutzes durch geschossweise Brandriegel eingehalten.

Die Innenwände dieser Konstruktionsvariante sind analog der Innenwandkonstruktion der Konstruktionsvariante 1. Ein Holzträgerwerk wird mit Lehmbauplatten beplankt und mit Lehmputz verputzt. Lediglich die Innenwände der Treppenhäuser und der Aufzugschächte werden aus Stahlbeton mit einem Recyclinganteil von 35 % angefertigt

Das Primärtragwerk des Daches besteht aus Brettschichtholzträgern, auf denen eine Brettschichtholzplatte aufliegt. Die Dämmung besteht aus Schaumglasplatten. Das Dach wird begrünt.

Die Aufstockung erfolgt ebenfalls in Holzbauweise.

4.3.3 Konstruktionsvariante 3

Für die dritte Konstruktionsvariante wird das Bestandsgebäude ebenfalls komplett abgebrochen und mit einer Konstruktion, welche überwiegend aus Stahlbeton besteht, wieder aufgebaut.

Die Tiefgarage besteht aus WU-Beton ohne Recyclinganteil.

Im Gegensatz zu der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 ist das Gebäude kein Skelettbau. Die Außenwände sind tragend und zusätzlich befinden sich im Innenbereich tragende, massive Stahlbetonwände. Die Außenwände werden mit einem Wärmedämmverbundsystem aus Mineralfaserdämmung und einem Kalkzementaußenputz gedämmt.

Das Dach wird oberhalb des Stahlbetons mit einer Polystyrolämmung gedämmt, mit einer Bitumenbahn abgedichtet und mit einer Kiesschüttung beschwert und vor UV-Strahlung geschützt. Die Dachfläche wird nicht begrünt.

4.3.4 Fenster

Bei der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 werden Holzrahmenfenster mit einem Rahmenanteil von 10 % und einer Dreifachverglasung verbaut. Eine Floatglas-Isolierscheibe besteht derzeit im besten Fall aus 30 % wiederverwertetem Glas.³² Dieser Wert wird für das MRC der Verglasung angenommen. Bei der Konstruktionsvariante 3 werden Kunststoffens-ter ohne Recyclinganteil verbaut. Für die Fenster wird ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,85 W/m²K angenommen.

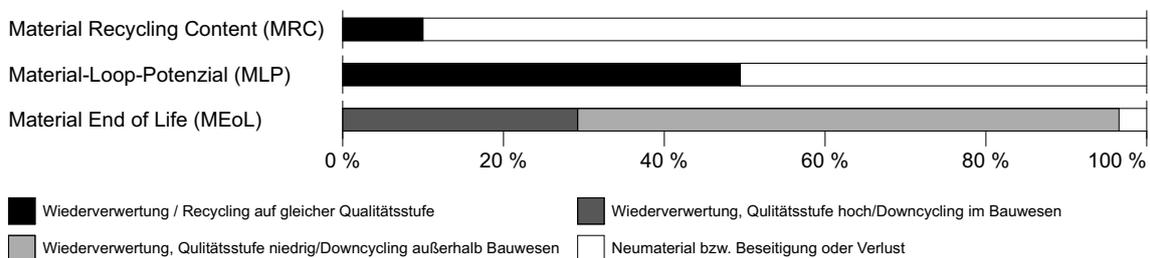
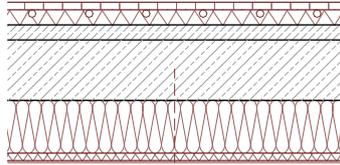


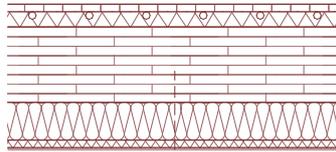
Abbildung 29 Material-Cycle-Status Floatglas für Isolierverglasungen nach Hillebrandt A. et al, Atlas Recycling

³² Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Recyclingpotenziale von Baustoffen, Seite 96 ff.

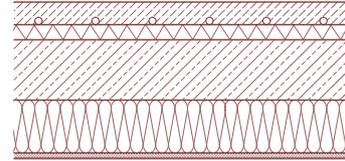
Unterste Geschossdecke, Transformation des Bestandes - 1803 m²



Außenluft



Außenluft



Außenluft

vertikaler Schnitt, M1:20 - von kalt nach warm

Konstruktion 1 - Bauteil 1

- 20 mm HWL-Leichtbauplatte
- 140 mm Mineralfaserdämmung
- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 40 mm Betonestrich
- 40 mm Trittschall, Holzfaser
- 20 mm Holzmassivdielen

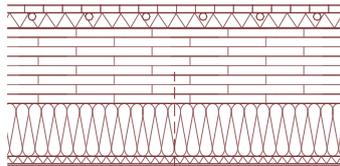
Konstruktion 2 - Bauteil 2

- 20 mm HWL-Leichtbauplatte
- 120 mm Mineralfaserdämmung
- 200 mm Holzmassivdecke, BSH
- 40 mm Trittschall, Holzfaser
- 20 mm Holzmassivdielen

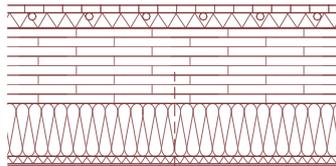
Konstruktion 3 - Bauteil 3

- 20 mm Außenputz, Kalkzement
- 140 mm Mineralfaserdämmung
- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 40 mm Trittschall Mineralfaser
- 60 mm Zementestrich

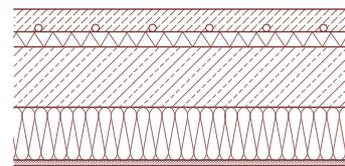
Unterste Geschossdecke Aufstockung - 774 m²



Außenluft



Außenluft



Außenluft

vertikaler Schnitt, M1:20 - von kalt nach warm

Konstruktion 1 - Bauteil 2

- 20 mm HWL-Leichtbauplatte
- 140 mm Mineralfaserdämmung
- 200 mm Holzmassivdecke, BSH
- 40 mm Trittschall, Holzfaser
- 20 mm Holzmassivdielen

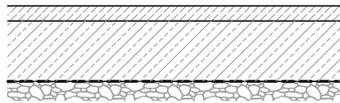
Konstruktion 2 - Bauteil 2

- 20 mm HWL-Leichtbauplatte
- 140 mm Mineralfaserdämmung
- 200 mm Holzmassivdecke, BSH
- 40 mm Trittschall, Holzfaser
- 20 mm Holzmassivdielen

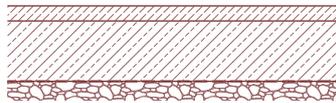
Konstruktion 3 - Bauteil 3

- 15 mm Außenputz, Kalkzement
- 140 mm Mineralfaserdämmung
- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 40 mm Trittschall Mineralfaser
- 60 mm Zementestrich

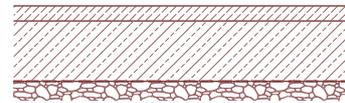
Unterste Geschossdecke Tiefgarage - 2203 m²



Erdreich



Erdreich



Erdreich

vertikaler Schnitt, M1:20 - von unten nach oben

Konstruktion 1

- 50 mm Ausgleichsschüttung, Kies
- 0,1 mm Sauberkeitsschicht PE-Folie
- 160 mm WU Beton, 2% Armierung
- 40 mm Zementestrich

Konstruktion 2

- 50 mm Ausgleichsschüttung, Kies
- 0,1 mm Sauberkeitsschicht PE-Folie
- 160 mm WU Beton, 2% Armierung, Recyclinganteil 35%
- 40 mm Zementestrich

Konstruktion 3

- 50 mm Ausgleichsschüttung, Kies
- 0,1 mm Sauberkeitsschicht PE-Folie
- 160 mm WU Beton, 2% Armierung
- 40 mm Zementestrich

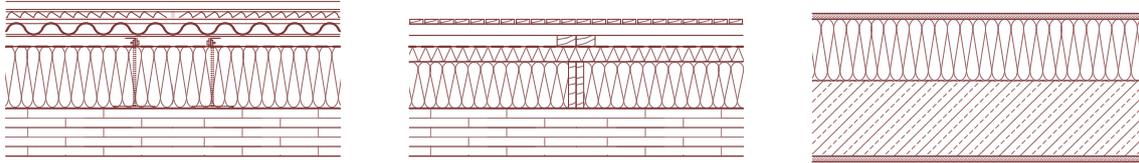
Legende:

Bestand

Neu

Abbildung 30 Details unterste Geschossdecke, M 1:20, eigene Darstellung

Außenwand, Transformation des Bestandes und Aufstockung - 3494 m²



horizontaler Schnitt, M1:20 - Schichtaufbau von warm nach kalt

Konstruktion 1 - Bauteil 4

- 125 mm Brettschichtholz, Fichte
- 160 mm Holzfaserdämmung
- 0,1 mm Winddichtigkeitsfolie
- 30 mm Luftschicht
- 0,5 mm Wellblech, wiederverwendet
- 0,5 mm Streckmetall, Aluminium

Konstruktion 2 - Bauteil 5

- 125 mm Brettschichtholz, Fichte
- 120 mm Holzfaserdämmung, weich
- 40 mm Holzfaserdämmung, hart
- 0,1 mm Winddichtigkeitsfolie
- 30 mm Luftschicht, Lattung 30x50
- 30 mm Konterlattung 30x50
- 15 mm Lärchenholzfassade, unbehandelt

Konstruktion 3 - Bauteil 6

- 15 mm Innenputz, Gips
- 200 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 160 mm Mineralfaserdämmung
- 15 mm Außenputz, Kalk

Außenwand Tiefgarage - 1186 m²



Erdreich



Erdreich

horizontaler Schnitt, M1:20



Erdreich

Konstruktion 1

- 200 mm WU-Beton, 2% Armierung

Konstruktion 2

- 200 mm WU-Beton, 2% Armierung, Recyclinganteil 35%

Konstruktion 3

- 200 mm WU-Beton, 2% Armierung

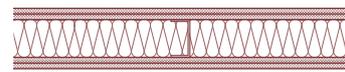
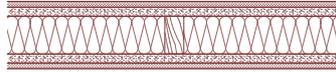
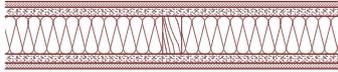
Legende:

Bestand

Neu

Abbildung 31 Details Außenwand, M 1:20, eigene Darstellung

Innenwand, Transformation des Bestandes und Aufstockung, nicht tragend



horizontaler Schnitt, M1:20

Konstruktion 1 - 5032 m²

- 15 mm Lehmputz
- 24 mm Lehmbauplatte
- 100 mm 10 % Vollholzträger
- 90 % Holzfaserdämmung
- 24 mm Lehmbauplatte
- 15 mm Lehmputz

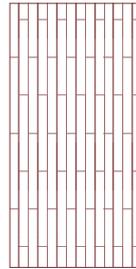
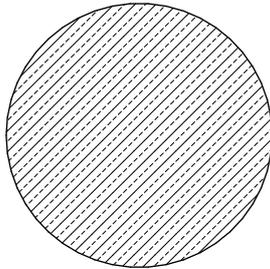
Konstruktion 2 - 5032 m²

- 15 mm Lehmputz
- 24 mm Lehmbauplatte
- 100 mm 10 % Vollholzträger
- 90 % Holzfaserdämmung
- 24 mm Lehmbauplatte
- 15 mm Lehmputz

Konstruktion 3 - 2516 m²

- 12,5 mm Gipskartonplatte
- 12,5 mm Gipskartonplatte
- 100 mm 2 % Aluminiumkonstruktion
- 98 % Mineralfaserdämm.
- 12,5 mm Gipskartonplatte
- 12,5 mm Gipskartonplatte

Stützen und tragende Innenwände



horizontaler Schnitt

**Konstruktion 1 - Stütze
786 lfdm***

Stahlbetonstütze, 2% Armierung
Durchmesser 70cm

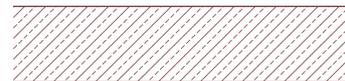
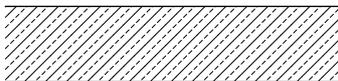
**Konstruktion 2 - Stütze
786 lfdm****

Holzstütze, BSH Fichte
70 cm x 35 cm

**Konstruktion 3 - tragende Innenwand
2516 m²**

15 mm Innenputz, Gips
200 mm Stahlbeton, 2% Armierung
15 mm Innenputz, Gips

Innenwand Treppenhaus und Aufzugsschacht - 1026 m²



horizontaler Schnitt, M1:20

Konstruktion 1

200 mm Stahlbeton, 2% Armierung

Konstruktion 2

200 mm Stahlbeton, 2% Armierung,
Recyclinganteil 35%

Konstruktion 3

200 mm Stahlbeton, 2% Armierung

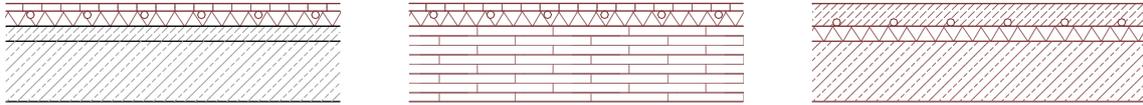
Legende:



* 1 lfdm Stütze [d = 70 cm] ≙ 1 m² Wandfläche mit einer Stärke von 38 cm
** 1 lfdm Stütze 70 cm x 35 cm ≙ 1 m² Wandfläche mit einer Stärke von 25 cm

Abbildung 32 Details Innenwand, M 1:20, eigene Darstellung

Geschossdecke, Transformation des Bestandes - 6528 m²



vertikaler Schnitt, M1:20 - von unten nach oben

Konstruktion 1

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 40 mm Betonestrich
- 40 mm Trittschall, Holzfaser
- 20 mm Holzmassivdielen

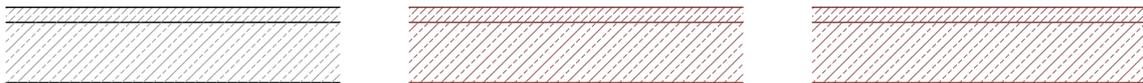
Konstruktion 2

- 200 mm Holzmassivdecke, BSH
- 40 mm Trittschall, Holzfaser
- 20 mm Holzmassivdielen

Konstruktion 3

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 40 mm Trittschall Mineralfaser
- 60 mm Betonestrich

Geschossdecke Tiefgarage - 4406 m²



vertikaler Schnitt, M1:20 - von unten nach oben

Konstruktion 1

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 40 mm Betonestrich

Konstruktion 2

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung, Recyclinganteil 35%
- 40 mm Betonestrich

Konstruktion 3

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 40 mm Betonestrich

Legende:



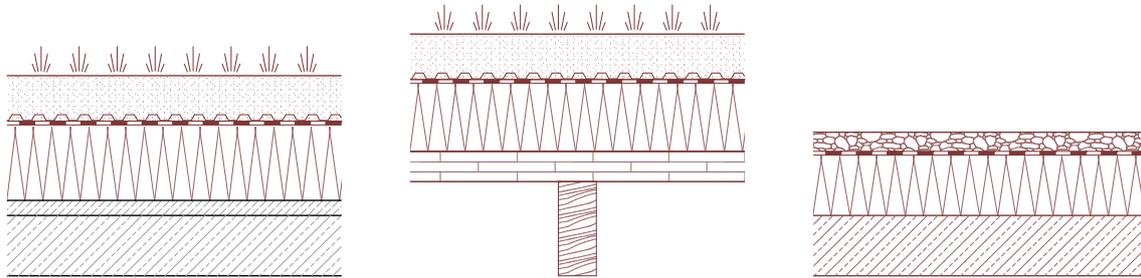
Bestand



Neu

Abbildung 33 Details Geschossdecke, M 1:20, eigene Darstellung

Dach, Transformation des Bestandes - 1632 m²



vertikaler Schnitt, M1:20 - von warm nach kalt

Konstruktion 1 - Bauteil 7

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 80 mm Holzmassivdecke, BSH
- 200 mm Schaumglasplatten
- 1 mm Bitumenabdichtung
- 1 mm Dränageschicht
- 100 mm Substrat

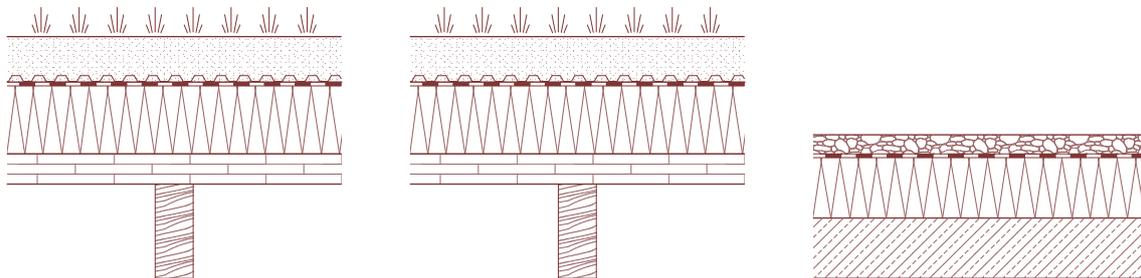
Konstruktion 2 - Bauteil 8

- 250 mm BSH Träger 250x100
- 80 mm Holzmassivdecke, BSH
- 180 mm Schaumglasplatten
- 1 mm Bitumenabdichtung
- 1 mm Dränageschicht
- 100 mm Substrat

Konstruktion 3 - Bauteil 9

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 160 mm Polystyrolämmung
- 1 mm Bitumenabdichtung
- 50 mm Kiesschüttung

Dach Aufstockung - 774 m²



vertikaler Schnitt, M1:20 - von warm nach kalt

Konstruktion 1 - Bauteil 8

- 250 mm BSH Träger 250x100
- 80 mm Holzmassivdecke, BSH
- 180 mm Schaumglasplatten
- 1 mm Bitumenabdichtung
- 1 mm Dränageschicht
- 100 mm Substrat

Konstruktion 2 - Bauteil 8

- 250 mm BSH Träger 250x100
- 80 mm Holzmassivdecke, BSH
- 180 mm Schaumglasplatten
- 1 mm Bitumenabdichtung
- 1 mm Dränageschicht
- 100 mm Substrat

Konstruktion 3 - Bauteil 9

- 160 mm Stahlbeton, 2% Armierung
- 160 mm Polystyrolämmung
- 1 mm Bitumenabdichtung
- 50 mm Kiesschüttung

Legende:

Bestand

Neu

Abbildung 34 Details Dach, M 1:20, eigene Darstellung

4.4 Anlagentechnik und Energieversorgung

Für die verschiedenen Konstruktionsvarianten wurden unterschiedliche Konzepte der Energieversorgung ausgearbeitet. Bei der Energieversorgung wird sowohl der dem Gebäude direkt zuzuweisende Energiebedarf (Heizen und Trinkwarmwasserbereitung), als auch der dem Gebäude nur indirekt zuzuweisende Energiebedarf (Allgemeinstrombedarf - Beleuchtung und Einsteckgeräte) betrachtet und in den Bilanzierungen mit berücksichtigt. Der Energiebedarf für Mobilität bleibt jedoch unberücksichtigt.

4.4.1 Allgemeinstrombedarf

Der Allgemeinstrombedarf wird im Rahmen dieser Arbeit als dem Strombedarf definiert, der in dem Gebäude durch die Nutzer und Nutzerinnen durch Einsteckgeräte und Beleuchtung verbraucht wird. Der Allgemeinstrombedarf ist bei allen Konstruktionsvarianten gleich und wird durch die Teilflächen und die Nutzung der Teilflächen auf der Grundlage der flächenspezifischen Verbrauchsangaben der Deutschen Energie-Agentur berechnet (vgl. Tabelle 4). Die Teilflächen unterscheiden sich dabei in „Wohnen“, „Büro“, „Gastronomie“ und „Sportgebäude“.

4.4.2 Wärmebedarf Trinkwarmwasser

Der Wärmebedarf für das Trinkwasser wird ebenfalls aus dem Tabellenwerk der Deutschen Energie-Agentur entsprechend der Teilflächen und die Nutzung dieser entnommen. (vgl. Tabelle 4) Da ein Großteil des Gebäudes der Wohnnutzung zugeschrieben werden kann, erfolgt die Trinkwasserbereitung in jeder Variante zentral über den Wärmeerzeuger der Heizungsanlage.

	Flächenspezifischer Wärmebedarf Trinkwarmwasser [kWh/m2a]	Flächenspezifischer Endenergiebedarf Nutzerstrom [kWh/m2a]
Büro	1.5	31.8
Gebäude für Forschung und Hochschullehre	3	32.4
Gebäude für Gesundheit und Pflege	6.9	42.9
Schule, Kindertagesstätte, Betriebsgebäude	3.9	21.8
Gebäude für Kultur und Freizeit	2.3	36.3
Sport und Fitness	23.4	25.2
Beherbergung, Gastronomie, Verpflegungsgebäude	28.8	115.7
Produktions, Werkstatt, Lager, Betriebsgebäude	1.2	45.2
Handelsgebäude	4.3	242.4
Technikgebäude (Ver- und Entsorgung)	0.9	222.7
Parkhaus	0.2	27
Wohnen	12.5	25

Tabelle 4 Referenzkennwerttabelle, Daten aus: Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023):
Zielparameter für klimaneutrale Nichtwohngebäude im Bestand

4.4.3 Endenergiebedarf Raumwärme

Wie bereits erwähnt wird der Endenergiebedarf für die Raumwärme durch EnerCalc bilanziert. Durch die Eingabe der Gebäudehüllfläche mit den entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile und der Anlagentechnik wird der Endenergiebedarf für die Raumwärme in Anlehnung an die Rechenvorgaben des GEG's beziehungsweise der DIN 18599 bilanziert. Da der unterschiedliche Strom- und Trinkwarmwasserbedarf der verschiedenen Zonen bereits durch den Allgemiestrombedarf und dem Wärmebedarf der Trinkwarmwasserbereitung abgedeckt sind, wird das Gebäude als Einzonenmodell vereinfacht.

Den verschiedenen Konstruktionen wird eine unterschiedliche Anlagentechnik zugeordnet, die Bauteile der thermischen Gebäudehülle wurden jedoch wie bereits erwähnt so konstruiert, dass diese in etwa den gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten haben, um die Konstruktionen gut vergleichbar zu machen. Die Berechnungen der Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile der thermischen Gebäudehülle sind im Anhang dieser Arbeit zu finden.

Das Gebäude des Entwurfes der Konstruktionsvariante 1 wird an das vor Ort vorhandene Fernwärmenetz von Düsseldorf angeschlossen. Dieses Fernwärmenetz wird durch eine Kraft-Wärme-Kopplung und von erneuerbaren Energien gespeist.³³ Für die Berechnung des GWP's wird der Endenergiebedarf für die Raumwärme mit dem Endenergiebedarf der Trinkwassererwärmung addiert und anschließend mit dem im GEG festgelegtem Emissionsfaktor für „Nah-/Fernwärme KWK erneuerbar“ in der Höhe von 40 gCO₂e/kWh multipliziert.³⁴

Bei der Konstruktionsvariante 2 wird eine zentrale Erdreichwärmepumpe zur Raumheizung und zur Aufbereitung des Warmwassers eingesetzt. Die Tiefenbohrungen für die Wärmepumpe erfolgen auf Rückseite des Gebäudes oder alternativ auf dem unbebautem Carlsplatz. Durch die gut gedämmte thermische Gebäudehülle und dem Einsatz einer Fußbodenheizung mit geringen Vorlauftemperaturen kann von einer Jahresarbeitszahl zwischen 3 und 5 ausgegangen werden. Die Jahresarbeitszahl ist in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und der Art der Wärmepumpe softwareseitig hinterlegt. Für die Berechnung des GWP's wird der Endenergiebedarf (Wärmebedarf/ Jahresarbeitszahl) für die Raumwärme mit dem Endenergiebedarf der Trinkwassererwärmung addiert und anschließend mit dem im GEG festgelegtem Emissionsfaktor für „Strom, netzbezogen“ in der Höhe von 560 gCO₂e/kWh multipliziert.³⁴

33 Netzgesellschaft Düsseldorf mbH - Fernwärmeprojekt Benrath und Holthausen - <https://www.netz-duesseldorf.de/unsere-infrastruktur/fernwaerme/fernwaerme-ausbau-benrath-holthausen/> [Zugriff am 20.01.2024]

34 Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechtes für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze vom 8. August 2020 (Gebäudeenergiegesetz - GEG) Anlage 8, Tabelle 3

Da als zweitwichtigste primäre Energiequelle im Jahr 2022 in 28,0 % der Neubauten in Deutschland Erdgas eingesetzt wurde,³⁵ wird bei der Konstruktionsvariante 3 eine Gas Zentralheizung (Brennwerttechnik) als Wärmeerzeuger verwendet. Für die Berechnung des GWP's wird der Endenergiebedarf für die Raumwärme mit dem Endenergiebedarf der Trinkwassererwärmung addiert und anschließend mit dem im GEG festgelegten Emissionsfaktor für „Erdgas, fossil“ in der Höhe von 270 gCO₂e/kWh multipliziert.³⁴

4.4.4 Photovoltaik

In der ersten und in der zweiten Konstruktionsvariante wird eine Photovoltaikanlage auf der Aufstockung des Entwurfes installiert. Um eine möglichst große Fläche mit Photovoltaik belegen zu können, wurde auf dem Dach der Aufstockung ein Flugdach installiert, welches eine Neigung von etwa 5% in Richtung Süden hat und von der Dimensionierung her über die Dachfläche der Aufstockung hinausragt. Das Flugdach wird so konstruiert, dass die Glas-Glas Module die Dachfläche ausbilden. Ein geringer Verlegeabstand der Module ermöglicht eine Entwässerung der Fläche auf das unterliegende Flachdach. Das Flugdach wurde in der Größe so angepasst, dass Module mit einer marktüblichen Größe (1.700 mm x 1000 mm) installiert werden können. Die Gesamtfläche der Photovoltaikanlage beträgt 972,40 m². Insgesamt werden 572 Module installiert.

Der Abbildung 34 ist zu entnehmen, dass die Fläche eine gleichmäßige solare Einstrahlung erfährt. Aufgrund der Positionierung des Flugdaches über der Firstlinie der direkten Umgebungsbebauung ergibt sich eine verschattungsfreie Situation. Die flächenspezifische Einstrahlung beträgt 962,8 kWh/m²a.

Für die Effizienz der Anlage wird ein Wirkungsgrad der Module von 20 % und ein Performance Ratio von 0,8 angenommen. Damit ergibt sich in der Summe eine jährliche in Bezug auf die Energiebezugsfläche spezifische Energiebereitstellung von 22,1 kWh/m²EBFa.

$$962,8 \text{ kWh/m}^2\text{a} \times 972,4 \text{ m}^2 \times 0,2 \times 0,8 / 6788 \text{ m}^2\text{EBF} = 22,1 \text{ kWh/m}^2\text{EBFa}$$

Bei der Konstruktionsvariante 3 wird keine Photovoltaikanlage installiert.

34 Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechtes für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze vom 8. August 2020 (Gebäudeenergiegesetz - GEG) Anlage 8, Tabelle 3

35 bwp (Bundesverband Wärmepumpe e.V.) - [https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/57-der-im-jahr-2022-gebauten-wohngebaeude-heizen-mit-waermepumpen/#:~:text=Waermepumpen%20wurden%20im%20Jahr%202022,bei%2031%2C4%20%25%20gelegen](https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/57-der-im-jahr-2022-gebauten-wohngebaeude-heizen-mit-waermepumpen/#:~:text=Waermepumpen%20wurden%20im%20Jahr%202022,bei%2031%2C4%20%25%20gelegen.). [Zugriff am 20.01.2024]

Für die Berechnung der Gutschrift des GWP's wird die Energiebereitstellung durch die Photovoltaik mit dem im GEG festgelegten Emissionsfaktor für „Strom, netzbezogen“ in der Höhe von $560 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}^{34}$ multipliziert und von dem zuvor berechnetem GWP der Nutzungsphase durch die Bereitstellung von Wärme und des Allgemiestrombedarfs subtrahiert.

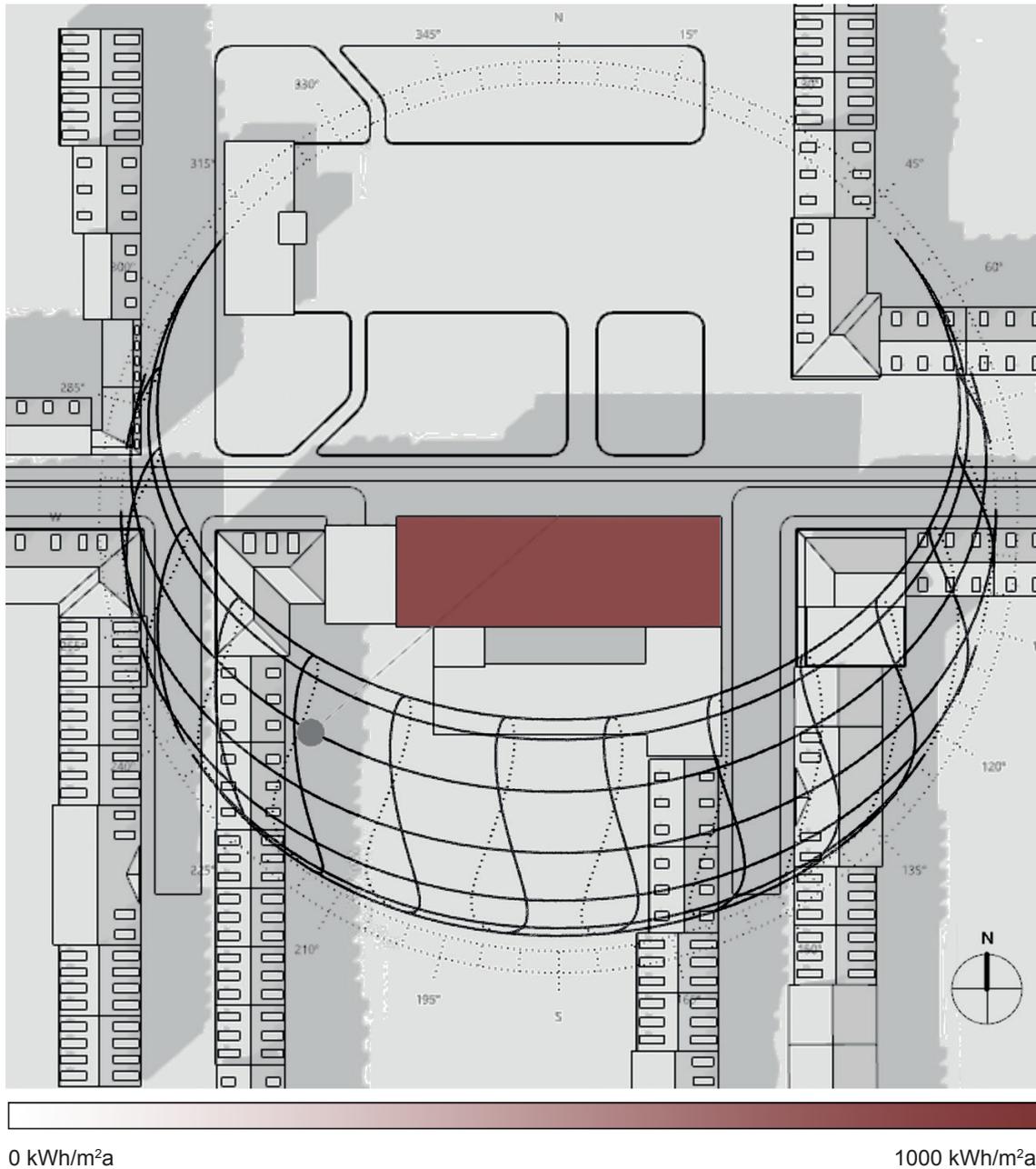


Abbildung 35 Dachaufsicht des Entwurfes, Solare Einstrahlung auf die für die Photovoltaikanlage vorgesehene Dachfläche der Transformation, eigene Darstellung

4.4.5 Stromspeicher

Da bei der Berechnung des GWP's der Nutzungsphase eine Gutschrift (560 gCO₂e/kWh) pro Einheit der bereitgestellten Energiemenge durch die Photovoltaik auf der Liegenschaft des Gebäudes erfolgt, ist es für diese Berechnung nicht relevant, ob ein Stromspeicher in dem Bilanzierungsgebäude vorhanden ist. Ein Stromspeicher hat jedoch den Vorteil, dass dieser dazu beitragen kann, starke Stromschwankungen im Stromnetz auszugleichen. Außerdem wird in der Regel bei der Installation einer Photovoltaikanlage ebenfalls ein Stromspeicher installiert, um den Autarkiegrad und den Eigenverbrauchsanteil zu steigern. Daher wird für die Konstruktionsvariante 1 und die Konstruktionsvariante 2 angenommen, dass ein Stromspeicher mit einer Speicherkapazität von 50 kWh installiert wird. Das GWP für die Herstellung des Stromspeichers wird in der Bilanzierung des GWP's des Anlagentechnik mit berücksichtigt. Da bei der Konstruktionsvariante 3 keine Photovoltaikanlage vorhanden ist, entfällt auch die Installation eines Stromspeichers.

4.4.6 Lüftung

Die Lüftung des Gebäudes erfolgt neben der individuellen und nutzerabhängigen Fensterlüftung über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Dabei wird in zwei Lüftungsbereiche unterteilt.

- Die Gastronomie, die Co-Working-Spaces und das Fitnessstudio werden über eine zentrale Lüftungsanlage mit Frischluft versorgt. Die vertikale Strangverteilung der Lüftungsanlage befindet sich dabei in einer Installationsebene in den dienenden Kernen. Um eine Installationsfreiheit auf dem Dach des Gebäudes gewährleisten zu können, befindet sich die Lüftungszentrale im Untergeschoss des Gebäudes.
- Da durch die geringe Geschosshöhe eine horizontale Verteilung der Lüftungsschächte einer zentralen Lüftungsanlage nur schwierig umzusetzen wäre, werden in die Wohneinheiten dezentrale Stürzlüfter mit Wärmerückgewinnung oberhalb der Außenfenster verbaut. In die innen liegenden Nassräume der Wohneinheiten werden Abluftanlagen verbaut, um diese entfeuchten zu können.

Für beide Lüftungssysteme wird ein konventioneller Wärmerückgewinnungsgrad von 60 % angenommen. Messungen ergaben, dass unter realen Bedingungen auch bei Stürzlüftern höhere Wärmerückgewinnungsgrade erreicht werden können.³⁶

36 Romina Risetto, Andreas Wagner, Karsten Voss, Tjado Voß, Marvin Kaliga - Deck-in-Vent: Entwicklung und Demonstration deckenintegrierter Ventilatoren im Rahmen der Gebäudesanierung des Landratsamtes Dillingen, S. 161

4.5 Strategische Indikatoren

Fortfolgend werden die entwurflichen Entscheidungen aufgezeigt, die einen Einfluss auf die strategischen Indikatoren der ökologischen Nachhaltigkeit haben.

4.5.1 Flächeneffizienz

Da alle drei Konstruktionsvarianten auf dem gleichen Entwurf basieren, ist die Flächeneffizienz bei allen Konstruktionsvarianten gleich zu bewerten. Unterschieden wird dabei jeweils in die Nutzungen „Büro“, „Wohnen“ und dem Fitnessstudio im Obergeschoss der Aufstockung der Transformation.

4.5.2 Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit

Da der Entwurf der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 als Skelettbau geplant ist, ist die Flexibilität und die Umnutzungsfähigkeit voraussichtlich als hoch zu bewerten. Das Gebäude der Konstruktionsvariante 3 besteht zu einem signifikanten Anteil aus tragenden Innenwänden. Die Flexibilität ist im Vergleich zu den beiden anderen Konstruktionsvarianten voraussichtlich geringer.

	KV1	KV2	KV3
• Weitestgehende Vermeidung tragender Innenwände	✓	✓	✗
• Trennwände können an jeder Fassadenachse des Grundrasters ohne Eingriff in Boden oder Decke eingebaut werden	✗	✗	✗
• Wände innerhalb einer vorgegebenen Struktur lassen Anpassung unterschiedlicher Grundrissangebote je nach Nachfrage zu	✓	✓	✗
• Der Großteil der Leitungsstränge der technischen Gebäudeausrüstung ist ohne Abbrucharbeiten erreichbar	✓	✓	✓

Abbildung 36 Fragenkatalog der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit der Konstruktionsvariante 1 (KV1), Konstruktionsvariante 2 (KV2) und Konstruktionsvariante 3 (KV3) [✓ = „Ja“, ✗ = „Nein“]

4.5.3 Flächeninanspruchnahme

Da alle drei Konstruktionsvarianten den gleichen Entwurf als Grundlage haben, ist auch die Flächeninanspruchnahme gleich zu bewerten. Die geschaffene Fläche des bebauten Raumes ist um ein Vielfaches höher, als die Grundstücksfläche. Da das Grundstück bereits bebaut ist, wird keine Fläche neu versiegelt.

4.5.4 Mobilitätsinfrastruktur

Für die Konstruktionsvariante 1 und 2 wird in den beiden Untergeschossen ein Mobility-Hub für die Gebäudenutzer und Gebäudenutzerinnen eingerichtet. Dort können motorisierte und nicht-motorisierte Fahrzeuge im Sharing-Konzept genutzt werden. In der Konstruktionsvariante 3 werden keine Sharing-Konzepte angeboten. Dort dienen die Parkplätze in den Untergeschossen lediglich als Parkfläche für den motorisierten Individualverkehr. Bei allen Konstruktionsvarianten befinden sich im Entwurf in der Erdgeschosszone Abstellplätze für Fahrräder.

	KV1	KV2	KV3
• Klar dem Gebäude zugeordnete Abstellanlagen für Fahrräder gut zugänglich am oder im Gebäude vorhanden	✓	✓	✓
• Stellplätze für Mobilitäts-Sharing (Car-, Roller-, Bike-Sharing etc.) in unmittelbarer Nähe vorhanden	✓	✓	✗
• Gute Anbindung an den örtlichen ÖPNV gewährleistet durch die Standortwahl des Gebäudes	✓	✓	✓
• Ausreichend Ladeinfrastruktur für den elektrifizierten Individualverkehr vorhanden	✓	✓	✗

Abbildung 37 Fragenkatalog der Mobilitätsinfrastruktur der Konstruktionsvariante 1 (KV1), Konstruktionsvariante 2 (KV2) und Konstruktionsvariante 3 (KV3) [✓ = „Ja“, ✗ = „Nein“]

4.5.5 Biodiversität

Bei allen drei Konstruktionsvarianten bleibt die unbebaute Fläche an der Innenhofsite des Grundstücks unversiegelt und wird begrünt. Bei der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 wird die Dachfläche auf der Transformation des Bestandes teilweise intensiv begrünt. Die Dachfläche der Aufstockung wird in beiden Konstruktionsvarianten unterhalb des Flugdaches extensiv begrünt. Bei der Konstruktionsvariante 3 wird keine Dachfläche begrünt.

4.6 Weitere relevante Parameter

Während für die Ermittlung der solaren Einstrahlung ein ortsspezifischer Wetterdatensatz genutzt wurde, wird für die Energiebereitstellung der Photovoltaikanlage das in der DIN 18599 festgesetzte Referenzklima für die energetischen Bilanzierungen genutzt.

Das Gebäude wird nicht gekühlt. (vgl. Zonierung nach DIN 18599 - 35 Wohnen MFH)

Der Wärmebrückenzuschlag des Referenzgebäudes beträgt $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$; der Wärmebrückenzuschlag der drei Konstruktionsvarianten ist mit einem Wert von $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ verbessert. (vgl. DIN 4108 Beiblatt 2)

Weitere relevante Parameter der drei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten und des Referenzgebäudes sind der unten stehenden Tabelle 5 zu entnehmen.

	Referenzgebäude	Konstruktionsvariante 1	Konstruktionsvariante 2	Konstruktionsvariante 3
Berechnungsgrundlage	National 18599	National 18599	National 18599	National 18599
Standort/Wetterdaten	DIN 18599, Referenzklima	DIN 18599, Referenzklima	DIN 18599, Referenzklima	DIN 18599, Referenzklima
Bauschwere	mittelschwer	mittelschwer	mittelschwer	schwer
Luftdichtheit n_{50}	1,057 1/h	1,057 1/h	1,057 1/h	1,057 1/h
Wärmebrückenzuschlag U_{WB}	standard ($0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)	verbessert (4108, $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$)	verbessert (4108, $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$)	verbessert (4108, $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$)
Fensterlüftung	DIN 18599-2 - 0,1 1/h			
Allgemeinstrombedarf	37,5 kWh/m ² EBZa			
U-Wert Fenster [U_w]	1,3 W/m ² K	0,85 W/m ² K	0,85 W/m ² K	0,85 W/m ² K
U-Wert Außenwände	0,24 W/m ² K	0,19 W/m ² K	0,19 W/m ² K	0,19 W/m ² K
U-Wert Dach	0,24 W/m ² K	0,19 W/m ² K	0,19 W/m ² K	0,19 W/m ² K
U-Wert Boden ($f_s=0,6$)	0,24 W/m ² K	0,17 W/m ² K	0,17 W/m ² K	0,17 W/m ² K
WRG Lüftung	60%	60%	60%	60%
Kühlung	keine	keine	keine	keine
Nettogrundfläche	6788 m ²	6788 m ²	6788 m ²	6788 m ²
Wärmeerzeuger	Gas, Brennwert	Fernwärme, KWK erneuerbar	Erdreichwärmepumpe	Gas, Brennwert
Übergabesystem	Heizkörper (55/45°C)	Fußbodenheizung (35/28°C)	Fußbodenheizung (35/28°C)	Fußbodenheizung (35/28°C)
Raumtemperaturregelung	PI-Regler (1K)	PI-Regler mit Optimierung	PI-Regler mit Optimierung	PI-Regler mit Optimierung
TWW (Nutzenergie)	12,1 kWh/m ² EBZa			
Fläche Solarkollektor	0 m ²	0 m ²	0 m ²	0 m ²
Modulfläche PV (n=0,2)	0 m ²	972,4 m ²	972,4 m ²	0 m ²
Stromspeicher	0 kWh	50 kWh	50 kWh	0 kWh
Zonendaten	vereinfacht, 35 Wohnen MFH			
spez. Gebäudehüllfläche	1,35 m ² _{Hüll} /m ² _{EBF}	1,35 m ² /m ² EBF	1,35 m ² /m ² EBF	1,35 m ² /m ² EBF
spez. Fensterfläche	0,21 m ² _{Fenster} /m ² _{EBF}			
Kompaktheit A/V _e	0,32 m ⁻¹	0,32 m ⁻¹	0,32 m ⁻¹	0,32 m ⁻¹

Tabelle 5 Relevante Parameter des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten

5 Ergebnisse

5.1 Kreislaufpotenzial der Konstruktion

5.1.1 Konstruktionsvariante 1

5.1.1.1 Bilanzraum 1

Bei dieser Konstruktionsvariante wurde die Bestandskonstruktion für die Transformation genutzt. In dem Bilanzraum 1 werden die Materialien des Bestandes als „wiederverwendete Materialien“ angegeben. Daher ist den Ergebnissen des UMI-Tools ist zu entnehmen, dass aufgrund dieser Nutzung des Bestandes ein Großteil des Gebäudes aus wiederverwendeten Materialien besteht. Da diese Aufteilung nach der Gewichtung der Masse des Materials erfolgt, ist aus der Abbildung 38 abzulesen, dass nur wenige nicht erneuerbare Primärrohstoffe für die Konstruktion eingesetzt worden sind. Am deutlichsten ist dies bei den Zwischendecken des Gebäudes zu erkennen. Da die Zwischendecken aus dem Bestand erhalten worden sind und diese nur auf der Oberseite mit einer Holzfaserdämmung aus nachhaltiger Forstwirtschaft und einem Massivholzparkett belegt worden sind, beträgt der Anteil der wiederverwendeten Materialien dieser Bauteilgruppe 98 %.

Der Abbildung ist außerdem zu entnehmen, dass ein Großteil der Materialien nicht erneut einem Stoffkreislauf zugeführt werden kann, da Beton nicht ohne Qualitätsverlust recycelt werden kann. Ersichtlich ist dies an dem Beispiel der Bauteile der untersten Geschossdecke, der Innenwände, der Zwischengeschossdecken und des Daches. Durch die Nutzung der Stahlbetonelemente des Bestandes ist das Potenzial des Materialkreislaufes im Pre-Use bei diesen Bauteilen sehr hoch, das Potenzial des Materialkreislaufes im Post-Use ist in Relation jedoch gering.

Insgesamt wurden 5032 m² Bauteilfläche an Innenwände in Holzständerbauweise verbaut. Für diese Wände wurde kein Material wiederverwendet. Dem gegenüber stehen 1026 m² Innenwandfläche aus Stahlbeton, welche aus dem Bestand erhalten werden. Dennoch liegt der Anteil der wiederverwendeten Materialien mit 67 % relativ hoch, da die Masse der wieder- bzw. weiterverwendeten Innenwände des Treppenhauses aus Stahlbeton auch in absoluten Zahlen deutlich höher ist, als die der neu entstehenden Innenwände in Holzständerbauweise.

Der Materialkreislauf des für den Entwurf notwendigen selektiven Rückbau (z.B. teilweiser Rückbau der Geschosszwischendecken und der Rückbau der Auffahrtsrampen) fließt dabei nicht in diese Bilanzierung des Kreislaufpotenzials der Konstruktion mit ein.

Insgesamt erreicht diese Konstruktion einen Urban Mining Indicator von 79 %. Optimierungspotenzial besteht bei den Fenstern. Jedoch kann aufgrund von Qualitätsverlusten von Glas in den Recyclingprozessen nur ein Anteil von 30 % an wiederverwerteten Materialien genutzt werden.

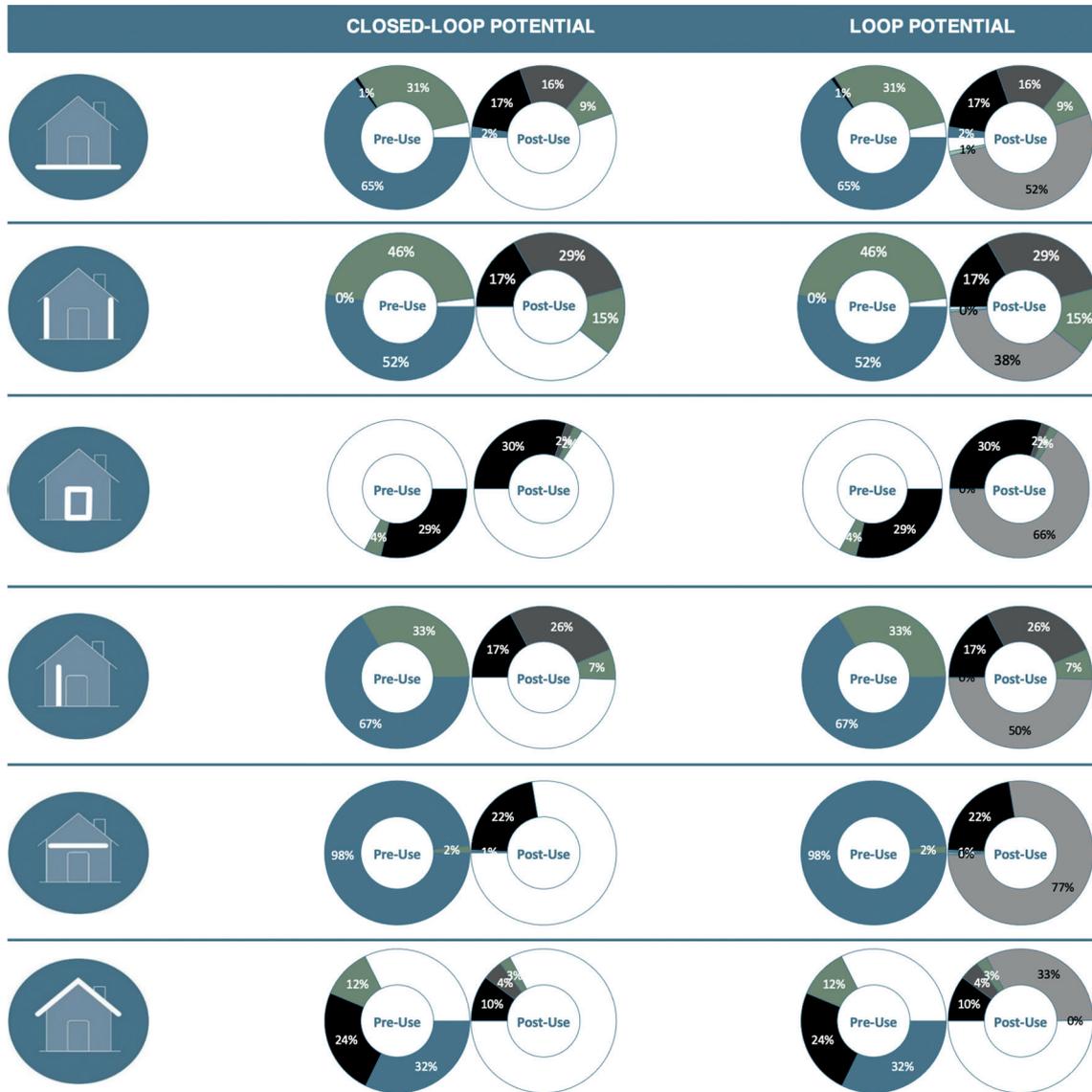


Abbildung 39 Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 1, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

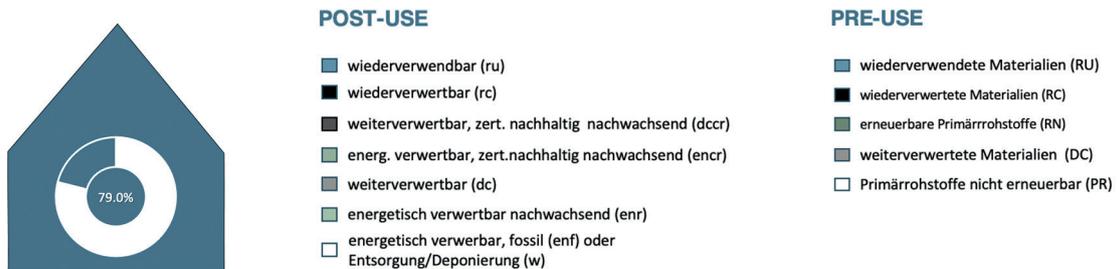


Abbildung 40 Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 1, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

5.1.1.2 Bilanzraum 2

Der Bilanzraum 2 bezieht sich ebenfalls auf die Konstruktionsvariante 1. Die untersuchte Konstruktion des Bilanzraumes 2 ist exakt die gleiche Konstruktion wie die des Bilanzraumes 1. Die Konstruktion des Bestandes wird also ebenfalls genutzt, um das Gebäude zu transformieren. Jedoch werden im Vergleich zu dem Bilanzraum 1 nur die Materialien auf das Kreislaufpotenzial untersucht, die für die Errichtung der Transformation dem Gebäude neu hinzugefügt werden. Die Bestandskonstruktion wird nicht mitbilanziert.

Im Vergleich zu den Ergebnissen des Bilanzraumes 1 mit einem Urban-Mining-Indicator von 79,0% ist der Urban-Mining-Indicator des Bilanzraumes 2 mit 71,5 % um 7,5 Prozentpunkte geringer. Der Abbildung 40 ist jedoch zu entnehmen, dass sich das Kreislaufpotenzial über die Bauteilgruppen im Closed-Loop-Potential gleichmäßiger im Pre-Use und Post-Use verteilt.

An dem Beispiel der Bauteilgruppe der untersten Geschossdecke lässt sich aussagen, dass das Kreislaufpotenzial des Bilanzraumes 2 im Closed-Loop bei dieser Bauteilgruppe mit einem Anteil an nicht erneuerbaren Primärrohstoffen von 19 % deutlich höher ist als der Anteil an nicht erneuerbaren Primärrohstoffen der untersten Geschossdecke in der Höhe von 3 % des Bilanzraumes 1. Im Post-Use hingegen ist die Performance der untersten Geschossdecke im Bilanzraum 2 besser, da das Kreislaufpotenzial des Bilanzraumes 2 mit 74 % deutlich höher ist, als das Kreislaufpotenzial des Bilanzraumes 2 der untersten Geschossdecke in der Höhe von 44 %.

In diesem Bilanzraum haben ebenfalls die Fenster als die Bauteilgruppe das geringste Kreislaufpotenzial. Bautechnisch lässt sich diese Bauteilgruppe nicht verbessern (vgl. Abbildung 28 „Material-Cycle-Status Floatglas für Isolierverglasungen nach Hillebrandt, A. et al, Atlas Recycling“, Seite 46). Ein höherer Urban-Mining-Indicator könnte jedoch trotzdem erreicht werden, indem der Anteil der Fensterfläche verringert wird, da die Bauteilgruppe der Außenwände ein höheres Kreislaufpotenzial aufweisen und den Urban-Mining-Indicator durch eine höhere Gewichtung der Außenwandfläche gegenüber der Fensterfläche damit erhöhen würde.

Da die Konstruktion der beiden Bilanzräume exakt gleich ist, können trotz unterschiedlicher Ergebnisse aus dem UMI-Tool keine Rückschlüsse gezogen werden, welche Betrachtungsebene oder Konstruktion besser oder schlechter ist. Es wurde lediglich aufgezeigt, dass je nach Art der Betrachtung der Konstruktion mit weiterverwendeten Bauteilen die Ergebnisse des Kreislaufpotenzials unterschiedlich ausfallen können.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Ergebnisse für die Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 1 verwendet.



Abbildung 41 Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

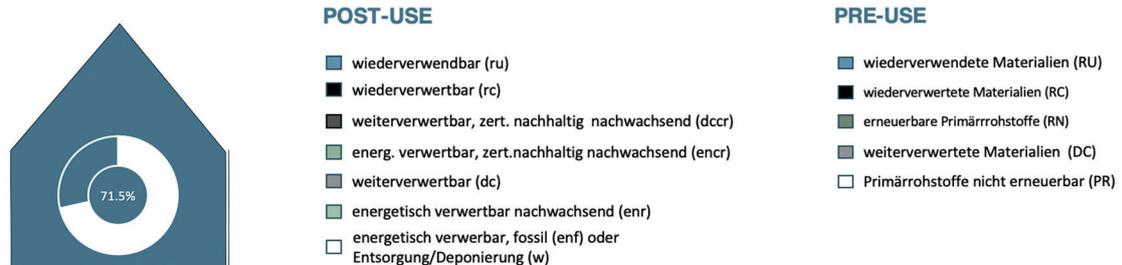


Abbildung 42 Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 1 des Bilanzraumes 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

5.1.2 Konstruktionsvariante 2

Bei dieser Konstruktionsvariante wurde der Bestand komplett rückgebaut. Die beiden Untergeschosse und die Konstruktion der Treppenhäuser wurde aus Beton mit einem Rezyklatanteil von 35 % konstruiert. Der restliche Baukörper wurde überwiegend mit Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft errichtet.

Der Abbildung 44 ist zu entnehmen, dass das Kreislaufpotenzial ähnlich hoch ist, wie das Kreislaufpotenzial der Materialien der Konstruktionsvariante 1. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, dass für die Bauteile Holz aus einer zertifiziert nachhaltigen Forstwirtschaft als erneuerbarer Primärrohstoff eingesetzt wird. Das hohe Kreislaufpotenzial resultiert demnach also auf dem geschlossenen biotischem Materialkreislauf (vgl. Abbildung 7 „Biotopischer und technischer Verwertungskreislauf in Anlehnung an die Cradle-to-Cradle Strategie von Braungart / Mc Donough, Quelle: Hillebrandt, A. et al, Atlas Recycling, Detail Verlag, 2018“ auf Seite 14).

Das Kreislaufpotenzial der Bauteile im Pre-Use der Konstruktionsvariante 2 ist zwar im Vergleich zu dem Kreislaufpotenzial der Bauteile im Pre-Use der Konstruktionsvariante 1 deutlich geringer, da Holz jedoch im Post-Use nach der Demontage kompostiert, nachhaltig energetisch verwertet oder weiterverwertet werden kann, ist das Post-Use Potenzial im Vergleich zu der Stahlbetonkonstruktion deutlich höher.

Insgesamt erreicht die Konstruktionsvariante 2 einen Urban-Mining-Indicator von 60,9 %.

Der Urban-Mining-Indicator der Konstruktion wäre nochmals deutlich höher, wenn auf die Errichtung beiden Untergeschosse verzichtet werden würde. So liegt beispielsweise der Anteil der erneuerbaren Primärrohstoffe der Außenwände oberhalb des Erdreiches bei 97 %. Obwohl für die Errichtung der beiden Untergeschosse ein Beton mit einem Rezyklatanteil (wiederverwertete Materialien RC) von 35% gewählt wurde, ist der Abbildung 43 ist zu entnehmen, dass das Kreislaufpotenzial dieser Außenwände der Tiefgarage deutlich schlechter ist.

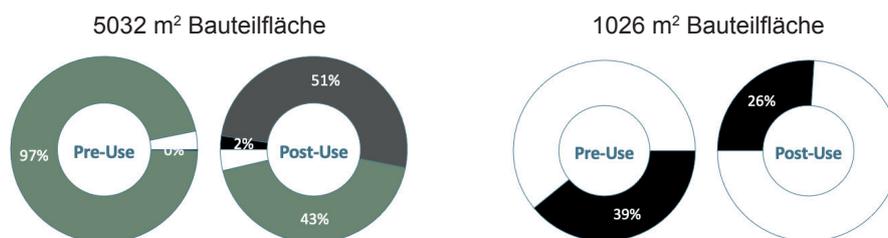


Abbildung 43 Gegenüberstellung des Kreislaufpotenzials (Closed-Loop-Potential) der Außenwände oberhalb des Erdreiches in Holzbauweise (links) und der Außenwände der Tiefgarage aus Stahlbeton (rechts)



Abbildung 44 Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

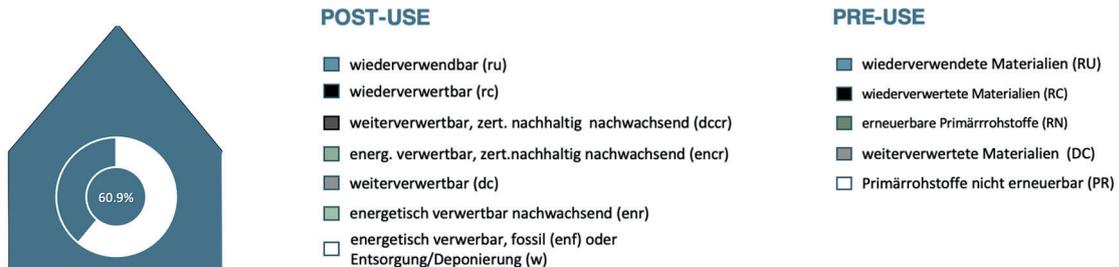


Abbildung 45 Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 2, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

5.1.3 Konstruktionsvariante 3

Bei dieser Konstruktionsvariante wurde der Bestand ebenfalls komplett rückgebaut. Abgesehen von nichttragenden Innenwänden wurde die gesamte Konstruktion aus Stahlbeton ohne Recyclinganteil konstruiert.

Den Ergebnissen des UMI-Tools ist zu entnehmen, dass der Urban-Mining-Indicator in der Höhe von 32,8 % deutlich geringer ist, als der Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 1 (79,0 %) und der Konstruktionsvariante 2 (60,9 %). Dies resultiert im Wesentlichen aus dem geringen Kreislaufpotenzials des verwendeten Betons.

Durch die Nutzung von Beton ohne Rezyklatanteile ist der Anteil der nicht erneuerbaren Primärrohstoffe im Pre-Use über alle Bauteile hinweg sehr hoch. Der wiederverwertete Anteil in der Höhe zwischen 5 % und 6 % (abgesehen von den Fenstern) resultiert dabei wesentlich aus dem Bewehrungsstahl, da der Stahlbeton einen Armierungsanteil von 2% hat. Der Bewehrungsstahl hat dabei eine höhere Masse (7800 kg/m³ nach DIN 10456) im Vergleich zu dem Beton (2400 kg/m³). Der verwendete Bewehrungsstahl weist einen Anteil von wiederverwerteten Materialien von 100 % auf, da Stahl aufgrund seiner Wiederverwertbarkeit ohne Qualitätsverlust schon heute in einem geschlossenem Materialkreislauf geführt werden kann.³⁷ Zwar kann auch für tragende Bauteile ein ressourcenschonender Beton mit Rezyklatanteilen verwendet werden, dieser wird jedoch in Deutschland - im Vergleich zu anderen Ländern wie beispielsweise der Schweiz, Belgien und den Niederlanden - immer noch zögerlich eingesetzt.²⁷

Der wiederverwendbare Anteil der Materialien des Flachdaches im Post-Use (Loop-Potential und Closed-Loop-Potential) resultiert aus der Verwendung einer Kiesschüttung als UV-Schutz der Bitumenabdichtung. Diese Kiesschüttung kann ohne Qualitätsverlust nach einem Rückbau erneut als wiederverwendetes Material ohne Qualitätsverlust eingesetzt werden.

Bei dem weiter gefasstem Loop-Potential ist ein Großteil der eingesetzten Materialien der Bauteile (zwischen 48 % und 78 %, je nach Bauteilgruppe), also der Beton, weiterverwertbar. Da der Beton meistens zu einem Produkt mit einer geringeren Qualitätsstufe weiterverwertet wird (z.B. als Ausgleichsschüttung für den Straßenbau), ist das Closed-Loop-Potential im Post-Use trotzdem sehr gering.

27 Betonherstellung und Klimaschutz - <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/recyclingbeton-930267> [Zugriff am 26.01.2024]

37 Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Recyclingpotenziale metallischer Materialien, Seite 61



Abbildung 46 Ergebnisse des Kreislaufpotenzials der Konstruktion, unterteilt in die Bauteilgruppen der Konstruktionsvariante 3, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

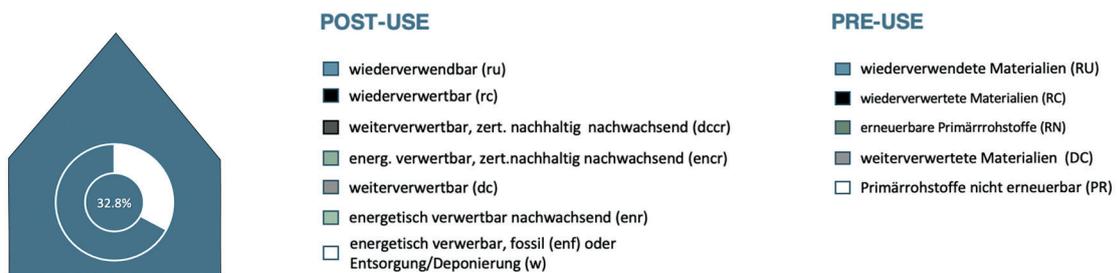


Abbildung 47 Urban-Mining-Indicator der Konstruktionsvariante 3, Darstellung aus dem UMI-Tool von Anja Rosen

5.2 Global Warming Potential

5.2.1 Konstruktion

Die Darstellung des GWP's der Konstruktion aus dem UMI-Tool erfolgt in die Unterteilung in die Herstellungsphase, dem Austausch, der Entsorgung und der Vorteile außerhalb der Systemgrenze in Anlehnung an die Lebenszyklusmodule eines Bauwerks in Anlehnung an die DIN 15978. Für die wiederverwendeten Materialien der Konstruktionsvariante 1 wurde ein GWP von 0 kgCO₂e angenommen.

Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass das GWP der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 in der Herstellungsphase negativ ist. Dies resultiert daraus, dass überwiegend Holz für diese Konstruktionen verwendet wurde. Das Holz hat in der Wachstumsphase CO₂ aus der Atmosphäre entzogen und ist stofflich in diesem Holz gebunden. Bei der Entsorgung wird dieses gebundene CO₂ wieder durch eine Kompostierung oder einer energetischen Verwertung in die Atmosphäre freigesetzt. Außerhalb der Systemgrenze erfolgt jedoch eine CO₂e-Grutschrift, da die energetische Verwertung aktuelle fossile Energieträger verdrängt. Die negativen Emissionen der Herstellung und die positiven Emissionen der Entsorgungsphase der Konstruktionsvariante 2 sind im Vergleich zu der Konstruktionsvariante 1 deutlich höher, da bei der Konstruktionsvariante 2 deutlich mehr Masse an Holz verwendet wurde. Bei der Konstruktionsvariante 3 (Stahlbetonkonstruktion) ist der Abbildung 48 zu entnehmen, dass das GWP der Herstellung sehr hoch ist. Vorteile außerhalb der Systemgrenze sind marginal.

Kumuliert erreicht das flächenspezifische GWP der Konstruktionsvariante 1 einen Wert von 0,4 kgCO₂e/m²EBFa. Die Konstruktionsvariante 2 hat ein GWP von 1,2 kgCO₂e/m²EBFa. Das höchste GWP mit einem Wert von 6,5 kgCO₂e/m²EBFa ist der Konstruktionsvariante 3 zuzuschreiben.

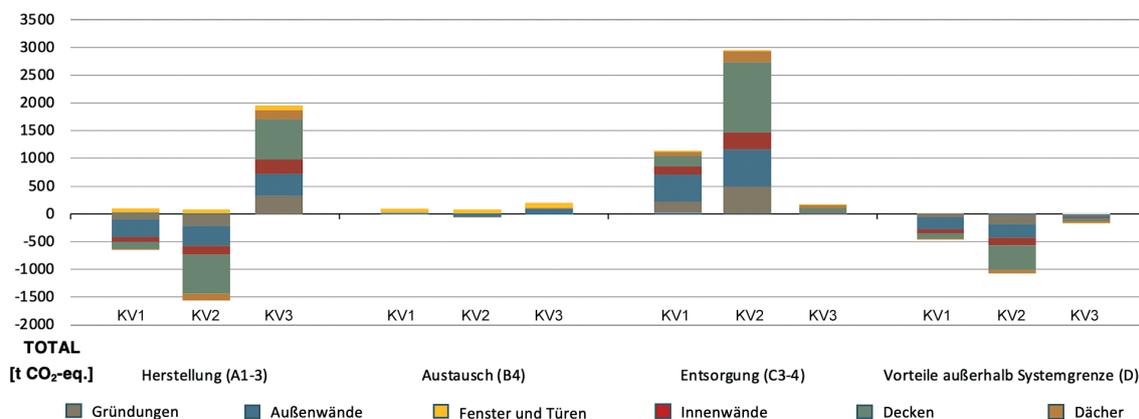


Abbildung 48 Vergleich des GWP's unter der Aufteilung der Lebenszyklusmodule in Anlehnung an die DIN15978

5.2.2 Anlagentechnik

Der Tabelle 6 und der Abbildung 49 ist zu entnehmen, dass das GWP der Anlagentechnik des Referenzgebäudes und der Konstruktionsvariante 3 im Vergleich zu dem GWP der Konstruktion fast vernachlässigbar klein ist. Wenn jedoch eine PV-Anlage verbaut wird (KV1 und KV2), dann ist das GWP deutlich höher und bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Emissionen nicht zu vernachlässigen.

Mit der Annahme, dass die PV-Module bei einem Lebenszykluszeitraum von 50 Jahren bis zum End-of-Life Szenario einmal ausgetauscht werden müssen, beträgt das GWP dieser Module bei einer installierten Leistung von 194,5 kW_p 2,84 kgCO₂e/m²EBFa. Dies ist mehr als sieben mal so hoch wie das gesamte GWP der Konstruktion der Konstruktionsvariante 1 (Nutzung des Bestandes, 0,4 kgCO₂e/m²EBFa) und mehr als doppelt so hoch, wie das gesamte GWP der Konstruktion der Konstruktionsvariante 2 (Holzkonstruktion Neubau, 1,2 kgCO₂e/m²EBFa).

	Elektroinstallation [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	Leitungssystem Wasserversorgung [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	Leitungssystem Lüftungsanlage [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	194,5 kW _p Photovoltaikmodule [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	50 kWh Batteriespeicher [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	Σ [kgCO ₂ e/m ² EBFa]
Referenzgebäude	0.03	0.02	0.39	0	0	0.44
Konstruktionsvariante 1	0.03	0.02	0.39	2.84	0.05	3.33
Konstruktionsvariante 2	0.03	0.02	0.39	2.84	0.05	3.33
Konstruktionsvariante 3	0.03	0.02	0.39	0	0	0.44

Tabelle 6 GWP der Anlagentechnik des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten

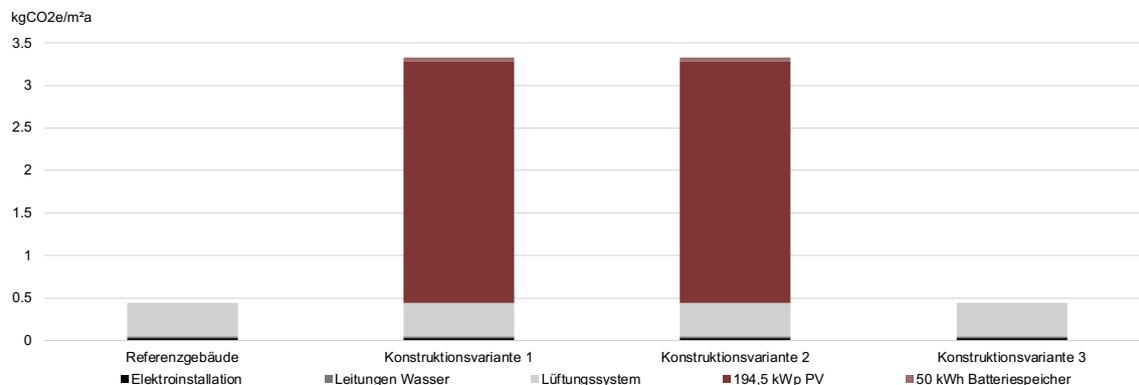


Abbildung 49 Gegenüberstellung des GWP's der Anlagentechnik des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung

5.2.3 Energiebedarf

Der Tabelle 7 und der Abbildung 50 sind zu entnehmen, dass die Höhe des GWP's des Energiebedarfs nicht analog zu der Höhe des Endenergiebedarfes ist.

Das Referenzgebäude und die Konstruktionsvariante 3 werden zwar beide mit Gas beheizt, aufgrund der besseren Gebäudehülle der Konstruktionsvariante 3 im Vergleich zu dem Referenzgebäude (vgl. Tabelle 5 „Relevante Parameter des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten“ auf Seite 58 und die Wärmedurchgangskoeffizientenberechnung der Bauteile der thermischen Gebäudehülle im Anhang dieser Arbeit) ist der Energiebedarf der Konstruktionsvariante 3 jedoch geringer.

Die Qualität der Gebäudehülle und alle weiteren Parameter, abgesehen von der Art der Energieversorgung (Fernwärme bei KV1, Erdreichwärmepumpe bei KV2), sind bei der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 gleich. Dennoch ist der Endenergiebedarf des Heizens und der Versorgung mit Trinkwarmwasser unterschiedlich. Der Energiebedarf der Konstruktionsvariante 1 (Fernwärme, Heizen und TWW kumuliert 45,5 kWh/m²EBFa) ist deutlich höher im Vergleich zu dem Energiebedarf der Konstruktionsvariante 2 (Wärmepumpe, Heizen und TWW kumuliert 14,7 kWh/m²EBFa). Nach Ergebnissen aus EnerCalc ist der Nutzwärmebedarf der beiden Konstruktionsvarianten zwar gleich hoch, durch die Nutzung der Umweltwärme (Erdreich) der Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von ca 3,7 [-] ist der Endenergiebedarf der Konstruktionsvariante 2 deutlich geringer.

Trotz des geringeren Endenergiebedarfs der Konstruktionsvariante 2 ist das GWP für das Heizen und der Trinkwarmwasserbereitung dieser Variante im Vergleich zu der Konstruktionsvariante 1, welche an das örtliche Fernwärmenetz angeschlossen ist, mehr als vier mal so hoch. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Emissionsfaktoren (40 gCO₂e/kWh zu 560 gCO₂e/kWh).

		Heizen	TWW	Allgemeinstr	Lüftung	Hilfsenergie*	PV**	Σ
Referenzgebäude (Gas-Brennwert)	Endenergiebedarf [kWh/m ² EBFa]	44.50	22.20	37.50	6.10	0.70	0.00	111.00
	GWP [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	10.68	5.33	21.00	3.42	0.39	0.00	40.82
Konstruktionsvariante 1 (Fernwärme)	Endenergiebedarf [kWh/m ² EBFa]	26.70	18.80	37.50	6.10	0.70	-22.10	67.70
	GWP [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	1.07	0.75	21.00	3.42	0.39	-12.38	14.25
Konstruktionsvariante 2 (Erdreichwärmepumpe)	Endenergiebedarf [kWh/m ² EBFa]	7.30	7.40	37.50	6.10	0.00	-22.10	36.20
	GWP [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	4.09	4.14	21.00	3.42	0.00	-12.38	20.27
Konstruktionsvariante 3 (Gas-Brennwert)	Endenergiebedarf [kWh/m ² EBFa]	27.30	21.70	37.50	6.10	0.70	0.00	93.30
	GWP [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	6.55	5.21	21.00	3.42	0.39	0.00	36.57

* Bei Wärmepumpe durch eine Erweiterung des Bilanzierungsrahmens bereits in "Heizen" enthalten

** negative Werte entsprechen einer Energiebereitstellung

Tabelle 7 Gegenüberstellung des flächenspezifischen Energiebedarfs und des flächenspezifischen GWP's

Im Vergleich zu der Konstruktionsvariante 3, welche abgesehen von der Energieversorgung für das Heizen und der Aufbereitung des Trinkwarmwassers (Gas-Brennwert bei KV 3 anstatt Erdreichwärmepumpe bei KV 2) die gleichen Eingabeparameter hat, ist das GWP für das Heizen und der TWW-Aufbereitung der Konstruktionsvariante 2 mit der Wärmepumpe nur 0,7 mal so hoch wie das der Konstruktionsvariante 3.

Durch die Energiebereitstellung der Photovoltaikanlage auf der Liegenschaft des Gebäudes beginnen die Balken des GWP's des Energiebedarfs der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 in der Abbildung 50 bei einem negativen Wert in Höhe von $-22,1 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{EBFa}$. Zum Vergleich: Das GWP zur Herstellung der Photovoltaikmodule beträgt $2,84 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{EBFa}$. Das GWP für die Herstellung der Module wird also durch die Energiebereitstellung wieder um ein Vielfaches ausgeglichen.

Mit einer Höhe von $21,0 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{EBFa}$ macht der Allgemeinstrombedarf (Beleuchtung und Einsteckgeräte) bei allen Varianten den größten Anteil des GWP's des Energiebedarfes aus.

Der Energiebedarf und das GWP der Lüftung ist bei dem Referenzgebäude und bei allen drei Konstruktionsvarianten gleich hoch. Die Hilfsenergie der Heizungsanlage - abgesehen von der Wärmepumpe - ebenfalls. Bei der Wärmepumpe wurde bei den Berechnungen die Hilfsenergie in EnerCalC durch eine Erweiterung des Bilanzraumes bereits in „Heizen“ inkludiert.

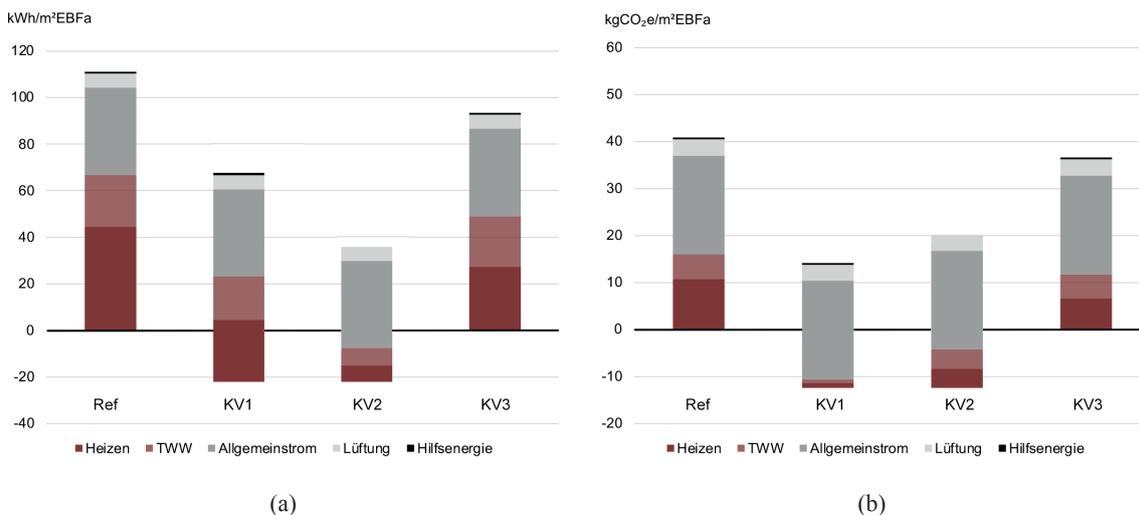


Abbildung 50 Gegenüberstellung der flächenspezifischen kumulierten Endenergiebedarfe (a) und dem kumulierten flächenspezifischen GWP (b) des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung

5.2.4 Kumulierte Ergebnisse

Der Tabelle 8 und der Abbildung 51 sind die flächenspezifisch kumulierten GWP's als Summe aus dem GWP der Konstruktion, der Anlagentechnik und des Energiebedarfs zu entnehmen. Bei allen drei Konstruktionsvarianten ist das GWP, welches aus der Energieversorgung resultiert, das höchste. Der Vergleich zwischen dem GWP des Referenzgebäudes (50,7 kgCO₂e/m²EBFa) und dem GWP der Konstruktionsvariante 1 (18,0 kgCO₂e/m²EBFa) zeigt den größten Unterschied auf. Das GWP des Referenzgebäudes ist im Vergleich zu dem GWP der Konstruktionsvariante 1 in etwa 2,8 mal höher. Dies resultiert aus der Gutschrift der Energiebereitstellung durch die PV (vgl. Abbildung 49 auf Seite 71), der verbesserten Gebäudehülle (vgl. Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten im Anhang) und aus dem geringeren Emissionsfaktor der Fernwärme (vgl. GEG Anlage 7) der Konstruktionsvariante 1. Auch das GWP der Konstruktionsvariante 3 (Stahlbetonkonstruktion, Gas - 43,5 kgCO₂e/m²EBFa) ist trotz gleicher Qualität der Gebäudehülle in etwa 2,4 mal so hoch wie das der Konstruktionsvariante 1. Das GWP der Konstruktionsvariante 2 (Neubau Holzkonstruktion, PV und Wärmepumpe) ist in der Summe mit 24,8 kgCO₂e/m²EBFa in etwa 1,4 mal so hoch wie das der Konstruktionsvariante 1.

	Konstruktion [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	Anlagentechnik [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	Energiebedarf [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	Σ [kgCO ₂ e/m ² EBFa]
Referenzgebäude	9.4	0.44	40.82	50.656
Konstruktionsvariante 1	0.4	3.33	14.25	17.982
Konstruktionsvariante 2	1.2	3.33	20.27	24.802
Konstruktionsvariante 3	6.5	0.44	36.57	43.508

Tabelle 8 Flächenspezifische kumulierte GWP's des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten

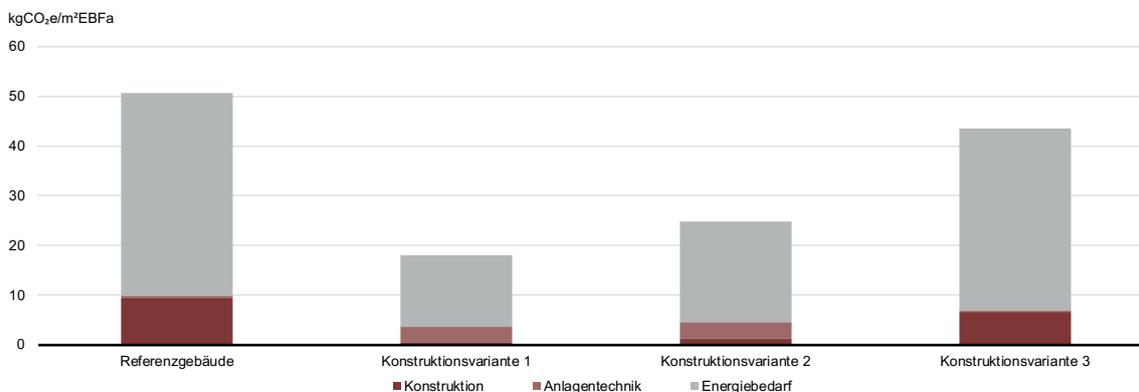


Abbildung 51 Flächenspezifische kumulierte GWP's aus Konstruktion, Anlagentechnik und Energiebedarf des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung

5.3 Strategische Indikatoren

Da alle Konstruktionsvarianten den gleichen Entwurf als Grundlage haben und sich die strategischen Indikatoren im wesentlichen auf eine Bewertung der entwurflichen Entscheidung beziehen, sind die erreichten Prozente im Vergleich relativ ähnlich.

Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Flexibilität. Während in der Konstruktionsvariante 1 und 2 gänzlich auf tragende Innenwände durch eine Konstruktion in Skelettbauweise verzichtet wird, ist die Flexibilität aufgrund tragender Innenwände bei der Konstruktionsvariante 3 geringer.

Auch die Mobilitätsinfrastruktur der Konstruktionsvariante 3 ist im Vergleich zu den beiden anderen Konstruktionsvarianten schlechter, da zwar alle Konstruktionsvarianten eine gute Bewertung durch die gute Anbindung an den ÖPNV haben, in der Konstruktionsvariante 3 wird in den beiden Untergeschossen jedoch nur eine Tiefgarage und keine Mobility-Hub eingerichtet.

Aufgrund der fehlenden Dachbegrünung bei der Konstruktionsvariante 3 wurde diese im Vergleich zu den anderen beiden Konstruktionsvarianten mit einer extensiven Dachbegrünung schlechter bewertet.

	Flächeneffizienz	Flexibilität	Flächenanspruch.	Mobilitätsinfrastruk.	Biodiversität	Σ
Konstruktionsvariante 1	17.6	15.0	20.0	20.0	11.4	84.0
Konstruktionsvariante 2	17.6	15.0	20.0	20.0	11.4	84.0
Konstruktionsvariante 3	17.6	5.0	20.0	10.0	2.8	55.4

Tabelle 9 Erreichte Prozentpunkte der strategischen Faktoren der drei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten (maximal jeweils 20 Prozentpunkte erreichbar)

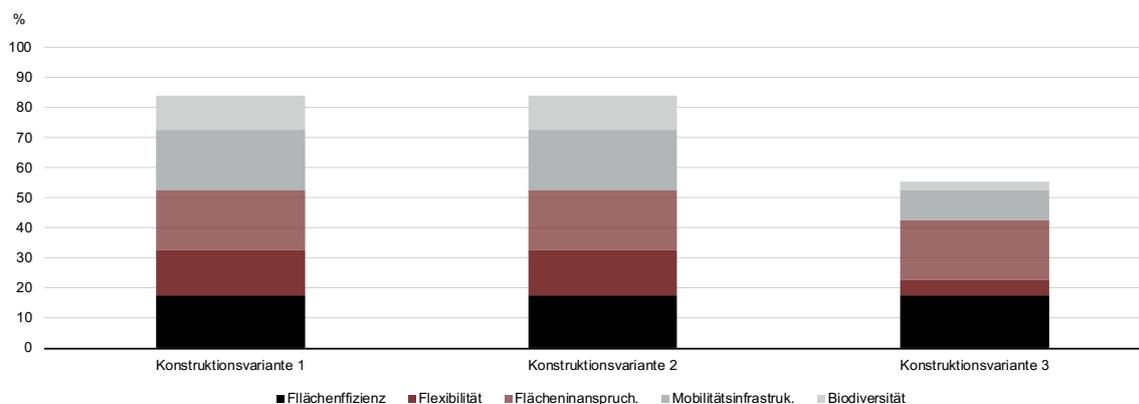


Abbildung 52 Erreichter Anteil der strategischen Faktoren der drei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung

5.4 Gesamtbewertung und Einordnung der Ergebnisse

Dem Netzdiagramm der Abbildung 53 ist die Gesamtbewertung der drei verschiedenen Konstruktionsvarianten zu entnehmen. Es wird ersichtlich, dass die Art der Konstruktion, die Art der Energieversorgung und die entworfenen Entscheidungen, die die strategischen Indikatoren beeinflussen, einen hohen Einfluss auf die Wirkabschätzung der Transformation des Gebäudes haben.

Die geringste Wirkabschätzung auf die Umwelt ist der ersten Konstruktionsvariante (Nutzung vom Bestand, Fernwärme und PV) zuzuschreiben. Durch die Nutzung der Konstruktion des Bestandes, der Energieversorgung durch die Fernwärme, welche einen geringen Emissionsfaktor hat ($40 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$), der Nutzung von regenerativen Energien durch die Installation einer Photovoltaikanlage auf dem Dach des Gebäudes und gut überdachten Entscheidungen auf der entworfenen Ebene, wie beispielsweise der Begrünung des Daches zur Steigerung der Biodiversität und die Planung von einem Mobility-Hub, konnte der negative Einfluss auf das Klima und die Umwelt des Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus reduziert werden.

Die Konstruktionsvariante 2 erfährt eine ähnlich gute Bewertung der Wirkabschätzung auf das Klima und die Umwelt. Durch die Nutzung von Holz aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft als wesentlichen Primärrohstoff der Konstruktion wird ein relativ guter Urban-Mining-Indikator von 60,9 % erreicht. Trotz der schlechten Emissionswerte des netzbezogenen Stromes ($560 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$) resultiert durch den hohen Wirkungsgrad der Wärmepumpe ein geringer Emissionsausstoß der Wärmeversorgung (Heizen und TWW) im Vergleich zu dem Referenzgebäude und der Konstruktionsvariante 3. Insgesamt werden jedoch im Vergleich zu der Konstruktionsvariante 1 mehr klimaschädliche Emissionen ausgestoßen.

Die schlechteste Bewertung erfährt die Konstruktionsvariante 3. In allen drei Kategorien wird die Wirkabschätzung am schlechtesten bewertet. Das Kreislaufpotenzial ist durch die hohe Masse an Beton ohne Rezyklatanteil mit einem Urban-Mining-Indikator von 32,8 % im Vergleich zu der Konstruktionsvariante 1 (Nutzung Bestand, 79,0 %) und der Konstruktionsvariante 2 (Neubau Holz, 60,9 %) deutlich geringer. Da der wesentliche Energieträger der Wärmeversorgung Gas ist, keine Photovoltaikanlage genutzt wird und viel Beton verbaut wurde, ist das GWP in der Summe aus dem GWP der Konstruktion, der Anlagentechnik und der Energieversorgung mit $43,5 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{EBFa}$ deutlich höher im Vergleich zu der Konstruktionsvariante 1 ($18,0 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{EBFa}$) und der Konstruktionsvariante 2 ($24,8 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{EBFa}$). In Relation zu dem Referenzgebäude bedeutet dies, dass der Abstand zwischen dem Referenzgebäude und der Konstruktionsvariante 3 im Vergleich zu den anderen beiden Konstruktionsvarianten geringer ist. Da im Vergleich zu den beiden anderen Konstruktionsvarianten die Dachfläche nicht begrünt wurde, kein Mobility Hub geplant ist und das Tragwerk aus tragenden Innenwänden besteht, welches die Flexibilität und die

Umnutzungsfähigkeit des Gebäudes einschränkt, ist das Ergebnis der strategischen Indikatoren mit einer Bewertung von 55,4 % ebenfalls schlechter im Vergleich zu den beiden anderen Konstruktionsvarianten (85 %).

Der Tabelle 10 und der Abbildung 53 ist ebenfalls zu entnehmen, dass bei dem GWP bei allen drei Varianten Optimierungspotenzial vorhanden ist. Die beste Bewertung des GWP's ist mit einem Faktor von lediglich 0,64 [-] des GWP's des Bilanzierungsgebäudes zu dem GWP des Referenzgebäudes bei der Konstruktionsvariante 1 vorhanden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fläche der Photovoltaikanlage in der Relation zu der Gebäudenutzfläche relativ gering ist. Bei Gebäuden mit einer hohen Geschossigkeit ist das Verhältnis der Dachfläche, die am besten für die Installation einer Photovoltaikanlage geeignet ist (Ausrichtung und Verschattungsfreiheit), zu der Gebäudenutzfläche in den meisten Fällen geringer, als das Dachflächenverhältnis bei kleineren Gebäuden. Dies zeigt aktuell Grenzen bei dem tatsächlichen Optimierungspotenzial des GWP's von Gebäuden in urbanen Agglomerationen mit einer hohen Bebauungsdichte auf.

	Kreislaufpotenzial der Konstruktion	Global Warming Potential	Strategische Indikatoren	Ø
Konstruktionsvariante 1	0.79	0.64	0.84	0.76
Konstruktionsvariante 2	0.61	0.51	0.84	0.65
Konstruktionsvariante 3	0.33	0.14	0.55	0.34

Tabelle 10 Faktoren der Wirkabschätzung der drei Konstruktionsvarianten unterteilt in das Kreislaufpotenzial der Konstruktion, dem Global Warming Potential und der strategischen Indikatoren

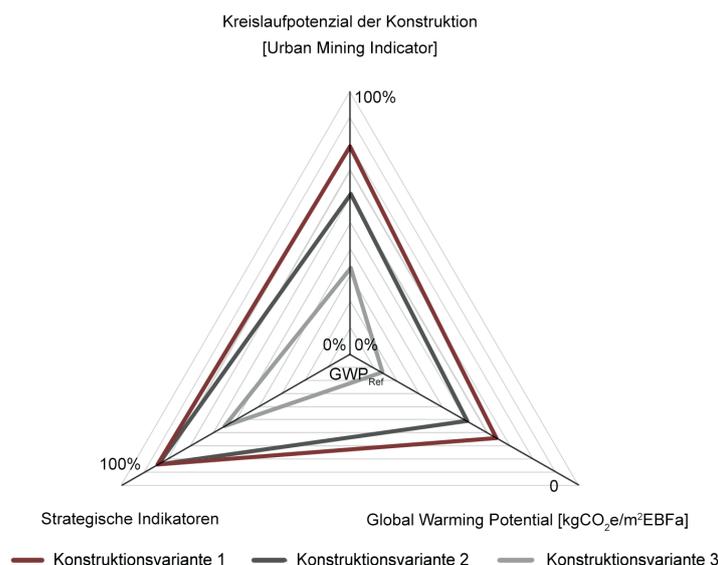


Abbildung 53 Netzdiagramm der Gesamtbewertung der Wirkabschätzung der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung

6 Diskussion

6.1 Limitationen der Bewertungen

6.1.1 Kreislaufpotenzial der Konstruktion

Aktuell lassen sich einige Limitationen bei der Bewertung des Kreislaufpotenzials der Materialien durch die Bestimmung des Closed-Loop-Potenzials und des Loop-Potenzials durch das UMI-Tool aufzeigen. Eine Limitation ist es beispielsweise, dass die Bewertung nur anhand Aufteilung der Masse der verwendeten Bauteile und die Art der Konstruktionsverbindungen erfolgt.

Eine genauere Erläuterung dieser Aussage erfolgt in der Form eines Vergleiches des Kreislaufpotenzials (Closed-Loop) einer Außenwand in Holzmassivbauweise und einer Außenwand in Holzskelettbauweise.

Für beide Varianten werden die gleichen Materialien verwendet, lediglich die Massenverteilung ist unterschiedlich. Beide hier aufgezeigte Konstruktionsvarianten erfüllen den gleichen Wärme- und Brandschutz und sind mit dem gleichen Fassadenmaterial konstruiert worden. Bei beiden Varianten wurde Holz aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft genutzt.

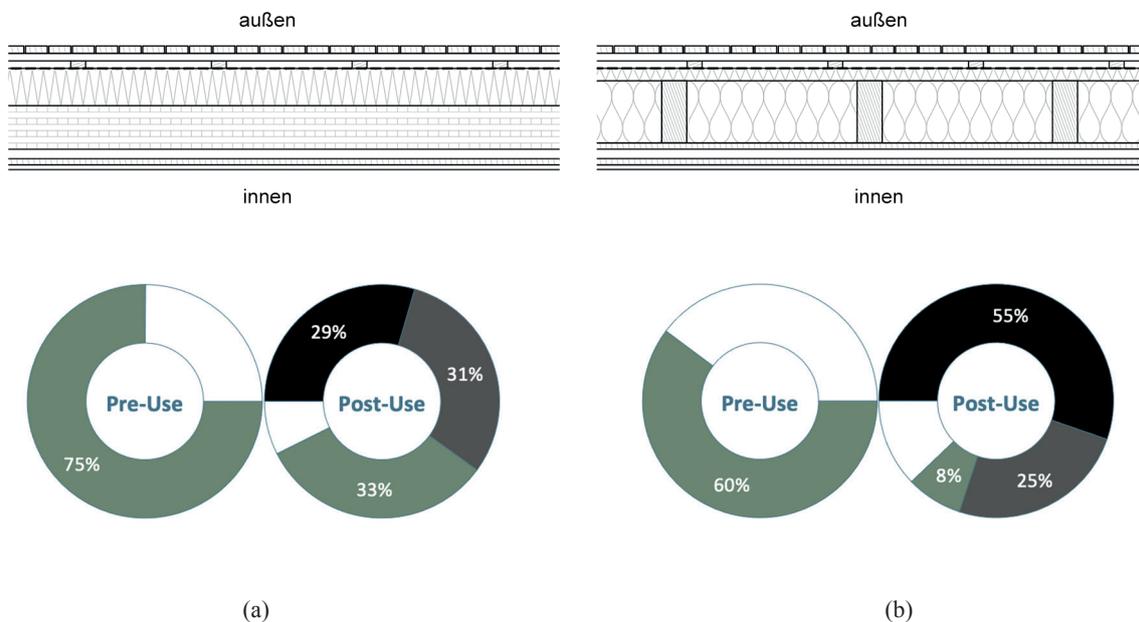


Abbildung 54 Gegenüberstellung des Details (M 1:20) der Außenwand und des Closed-Loop-Potenzials in Holzmassivbauweise (a) mit dem Detail (M 1:20) der Außenwand und dem Closed-Loop-Potential in Holzskelettbauweise (b)

Das Beispiel des Vergleiches des Kreislaufpotenzials (Closed-Loop) der Außenwand in Holzmassivbauweise mit der Außenwand in Holzskelettbauweise zeigt auf, dass die Performance der Kreislauffähigkeit der Materialien im Pre-Use (75 % zu 60 %) und im Post-Use (93 % zu 88 %) der Außenwand in Holzmassivbauweise besser ist.

Allein aus den Darstellungen des Kreislaufpotenzials aus dem UMI-Tool ist jedoch lediglich nur die Aufteilung des Kreislaufpotenziales der verwendeten Materialien mit Bezug auf die Bauteilmasse aufgezeigt. Dies bringt ein hohes Maß an Komplexität in die Beurteilung des Vergleiches der beiden Konstruktionsweisen mit ein.

Es ist zu bedenken, dass die Masse des Massivbaus im Vergleich zu der leichteren Holzrahmenkonstruktion deutlich höher ist. Daraus resultiert für den Bau der massiven Holzkonstruktion insgesamt ein deutlich höherer Bedarf an Primärrohstoffen. Dieser Bedarf wird zwar aus dem erneuerbaren Primärrohstoff Holz gedeckt, jedoch ist der komplette Verzicht auf die Einführung neuer Primärrohstoffe in einen Stoffkreislauf oder die Reduzierung der Primärrohstoffe auf der ökologischen Betrachtungsebene sinnvoller, da durch den Verzicht der Verwendung von Rohstoffen Ressourcen geschont werden.

Da dies aus dem Vergleich der zwischen der Konstruktion in Holzmassivbauweise und der Konstruktion in Holzskelettbauweise nicht zu entnehmen ist, wäre dies in einer genaueren Untersuchung zusätzlich zu analysieren.

Ein höherer Bedarf an dem Rohstoff Holz würde trotz der nachwachsenden Eigenschaft in einer breiten Anwendung aus zertifiziert nachhaltigen Quellen schwieriger in einem ausreichendem Maß zu decken. Aufgrund dessen performt der Holzrahmenbau im Vergleich zu dem Holzmassivbau mit Bezug auf die ökologische Bewertung entgegengesetzt der Ergebnisse aus dem UMI-Tool also trotzdem besser.

Da für die Konstruktion der Konstruktionsvariante 1 und der Konstruktionsvariante 2 im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls massive Brettschichtholzplatten eingesetzt und untersucht worden sind, ist dies bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

Für eine noch detaillierte Aussage über das Kreislaufpotenzial der Materialien beziehungsweise der Nachhaltigkeit der Baukonstruktion müsste ein weiterer Indikator für die verwendete Masse angegeben werden, wenn unterschiedliche Konstruktionen miteinander verglichen werden.

6.1.2 Global Warming Potential

6.1.2.1 Konstruktion

Für die Berechnung des GWP's der Konstruktion werden die Vorteile außerhalb der Systemgrenze in die Berechnung inkludiert. Nach der Nutzungsphase eines Gebäude im End-of-Life Szenario werden beispielsweise Teile der Holzkonstruktion in eine energetische Verwertung, zum Beispiel als Brennstoff für das Heizen mit einer Pelletheizung, überführt. Laut den Daten der Ökobaudat führt dies zur Verdrängung von fossilen Brennstoffen, aus dem die Emissionsgut-schrift im Modul D resultiert. Bei einer Lebenserwartung eines Gebäudes von 50 Jahren ist jedoch davon auszugehen, dass ein Großteil der Energie auch im Wärmebereich - zum Beispiel durch die Nutzung von Wärmepumpen in der Kombination mit einem dekarbonisiertem Stromnetz - im Vergleich zu heute überwiegend aus regenerativen Energiequellen stammt.³⁸ Daher können die heutigen Emissionswerte nur schwierig als Referenzwert für den Verdrängungsmix der Zukunft angenommen werden. Andere Annahmen hingegen würden auf Zukunftsspekulationen des aktu-ellen Trends beruhen und die Berechnungen und Bilanzierungen müssten für eine bessere Ver-gleichbarkeit in verschiedene Szenarien unterteilt werden. Dies würde die Komplexität der Bilan-zierung erheblich erhöhen.

6.1.2.2 Anlagentechnik

Der signifikante Anteil des GWP's der Konstruktion resultiert aus der Installation der Photovol-taikanlage (vgl. Abbildung 49 „Gegenüberstellung des GWP's der Anlagentechnik des Referenz-gebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung“, Seite 69). Das GWP beruht auf der Annahme, dass die PV-Module nach 25 Jahren ausgetauscht werden. Das GWP für die Herstellung der Photovoltaikmodule in 25 Jahren ist in der Bilanzierung jedoch genau so hoch, wie das GWP der Photovoltaikmodule heute. Wie im Kapitel „6.1.2.1 Konstruktion“ bereits be-schrieben, ist in der Zukunft von einer Dekarbonisierung des Stromnetzes und damit auch von einer Dekarbonisierung der Industrie für die Herstellung der Photovoltaikmodule auszugehen. Dies würde das GWP der Photovoltaikmodule signifikant verkleinern. Bereits heute ist laut Un-tersuchungen des Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE das GWP von PV-Modulen je nach Herstellungsart und Produktionsland schon stark unterschiedlich und schwankt zwischen 420 kgCO₂e/kW_p und 810 kgCO₂e/kW_p.³⁹ Daraus resultiert eine hohe Varianz der Ergebnisse.

38 Rat der Europäischen Union - „Fit für 55“ - <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> [Zugriff am 26.02.2024]

39 Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE - https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2021/2221_ISE_d_PI_CO2-Fussabdruck-von-PV-Modulen.pdf [Zugriff am 26.02.2024]

6.1.2.3 Energiebedarf

Bei allen Konstruktionsvarianten resultiert der größte Anteil des GWP's, welcher aus dem Energiebedarf in der Nutzung des Gebäudes resultiert, aus dem Allgemenstrombedarf (vgl. Abbildung 50 „Gegenüberstellung der flächenspezifischen kumulierten Endenergiebedarfe (a) und dem kumulierten flächenspezifischen GWP (b) des Referenzgebäudes und der drei Konstruktionsvarianten, eigene Darstellung“, Seite 71). Der Allgemenstrombedarf, welcher sich im Rahmen dieser Arbeit aus dem Strombedarf der Beleuchtung und dem Strombedarf der Einsteckgeräte zusammensetzt, lässt sich jedoch nur schwierig abschätzen, da die Nutzer und Nutzerinnen des Gebäudes durch die Art der Verwendung der Geräte und die Energieeffizienz der Beleuchtung und der Einsteckgeräte den Energiebedarf wesentlich beeinflussen. Eine Beeinflussung der Nutzer und Nutzerinnen des Gebäudes auf die Wahl der Einsteckgeräte und der Energieeffizienz dieser können von einem Planer nur schwer bis gar nicht beeinflusst werden. Dies zeigt aktuell Grenzen des Optimierungspotenzials auf.

Außerdem basiert das GWP des Strombedarfs in dieser Berechnung auf den im GEG festgesetzten Emissionsfaktor für Strom von 560 gCO₂e/kWh. In der Realität jedoch schwanken die Emissionen im deutschen Stromnetz je nach anteiliger Verteilung der Energieerzeuger. Beispielsweise lag laut Umweltbundesamt der Emissionsfaktor im Jahr 2020 mit 432 gCO₂e/kWh deutlich unter dem im GEG festgesetzten Emissionsfaktor für Strombezug aus dem Netz.⁴⁰ Außerdem ist in Zukunft wie im Kapitel „6.1.2.1 Konstruktion“ von einer Dekarbonisierung des Energiemixes auszugehen. Da der Allgemenstrombedarf (Summe aus Einsteckgeräte und Beleuchtung) das höchste GWP des Energiebedarfs hat, würde dies die Ergebnisse stark positiv beeinflussen.

6.1.3 Strategische Indikatoren

Bei den strategischen Indikatoren wurden nur einige Indikatoren für die Bewertung der Nachhaltigkeit auf ökologischer Ebene ausgewählt. Durch dieses selektive Verfahren fallen weitere eventuell wichtige Indikatoren (z.B. Toxizität und Nutzung von Frischwasser) aus dem Bewertungsrahmen dieser Arbeit heraus.

Außerdem erfolgte eine gleichmäßige Verteilung der maximal erreichbaren Prozentpunkte (20 Prozentpunkte je Indikator). Dies führt zu einer Verzerrung der Ergebnisse, wenn einige Indikatoren eine höhere Gewichtung der Wirkabschätzung auf die Umwelt aufweisen, als andere.

40 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau - Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf [Zugriff am 26.02.2024]

6.2 Zukunftsszenario

Da wie in dem Kapitel der Limitationen der Bewertung bereits beschrieben das GWP kein über die 50 Jahre der Lebensdauer des Gebäudes festgeschriebener Wert ist, da sich dieser aufgrund von Veränderung der äußeren Einflüsse - wie beispielsweise dem Ausbau der regenerativen Energien - verändert, wird fortfolgend ein Zukunftsszenario aufgezeigt, in dem dargestellt werden soll, wie sich das GWP des Bilanzierungsgebäudes in einem Ausblick verändern könnte.

Für diesen Ausblick des Zukunftsszenarios wurde angenommen, dass in Zukunft durch die Dekarbonisierung des Stromnetzes der Emissionsfaktor des Strombezugs 50 gCO₂e/kWh beträgt. Zum Vergleich: 2023 betrug der Emissionsfaktor des Strommixes in Frankreich 53 gCO₂e/kWh.⁴¹ Außerdem wurde angenommen, dass bei dem Austausch der Photovoltaikmodule in 25 Jahren keine Emissionen mehr ausgestoßen werden.

Neben dem Referenzgebäude wurde auch eine weitere Konstruktionsvariante untersucht. Das GWP der Konstruktionsvariante „Szenario“ setzt sich zusammen aus dem GWP der Konstruktion der Konstruktionsvariante 3 (Stahlbetonkonstruktion), dem GWP der Anlagentechnik inklusive Photovoltaikmodule (Austausches der Module nach 25 Jahren ohne Emissionsausstoß) und dem GWP der Energieversorgung der Konstruktionsvariante 2 (Erdreichwärmepumpe mit Photovoltaik)

Der Abbildung 55 ist zu entnehmen, dass bei einer Dekarbonisierung des Stromnetzes die Emissionen signifikant reduziert werden. Vor allem die Reduktion der Konstruktionsvariante 2 (Holzmassivbau, Photovoltaik und Wärmepumpe) zwischen den Werten der Berechnungen mit den Emissionsabgaben des GEG's und den Annahmen der Dekarbonisierung des Stromnetzes sind sehr hoch. Während die Konstruktionsvariante 2 nach Angaben des GEG's bezüglich der Emissionsfaktoren einen kumulierten Ausstoß an Emissionen in der Höhe von in etwa 27 kgCO₂e/m²EBFa hat, beträgt der Ausstoß unter der Verwendung der Emissionsfaktoren des Ausblicks mit 3 kgCO₂e/m²EBFa nur in etwa ein Neuntel.

Die Auswertung des weiteren Konstruktionszenarios (Stahlbetonkonstruktion, Wärmepumpe und Photovoltaik) zeigt auf, dass bei geringeren Emissionsfaktoren der Anteil des GWP's des Bauwerks (Konstruktion und Anlagentechnik) in Relation überwiegt. Während das GWP der Konstruktion 8,4 kgCO₂e/m²EBFa beträgt, liegt der Wert für das GWP der Energieversorgung bei 1,92 kgCO₂e/m²EBFa.

41 Electricity Maps - <https://app.electricitymaps.com/map> [Zugriff am 26.02.2023]

Diese Untersuchung des Zukunftsszenarios zeigt auf, dass die aktuellen Angaben des GWP's keine statischen Werte sind, sondern sich über den Verlauf der Zeit durch äußere Einflüsse verändern. Die Höhe der Veränderung basiert dabei auf den Grad der Dekarbonisierung des Stromnetzes durch den Ausbau der regenerativen Energien. Voraussetzung für ein geringeres GWP in der Zukunft ist dabei, dass schon heute auf den Einbau einer Anlagentechnik, welche auf fossilen Brennstoffen beruht (z.B. Gas-Brennwert) verzichtet wird, um diesen Hebel nutzen zu können.

Diese Veränderung wurde jedoch aufgrund der nur schwer vorherzusagenden Entwicklung der Dekarbonisierung in der Nachhaltigkeitsbewertung auf ökologischer Ebene im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

		Konstruktion	Anlagentechnik	Energiebedarf	Σ
Referenzgebäude	Σ GWP, GEG [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	9.40	0.44	40.82	50.66
(GWP _K nach DGNB-Ref., keine PV, Gas)	Σ GWP, Ausblick [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	9.40	0.44	18.36	28.20
Konstruktionsvariante 1	Σ GWP, GEG [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	0.40	3.33	14.25	17.98
(Nutzung Bestand, PV & Fernwärme)	Σ GWP, Ausblick [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	0.40	1.91	3.00	5.31
Konstruktionsvariante 2	Σ GWP, GEG [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	1.20	3.33	20.27	24.80
(Neubau Holz, PV & Wärmepumpe)	Σ GWP, Ausblick [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	1.20	1.91	1.92	5.03
Konstruktionsvariante 3	Σ GWP, GEG [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	6.50	0.44	36.57	43.51
(Neubau Stahlbeton, keine PV, Gas-Brennwert)	Σ GWP, Ausblick [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	6.50	0.44	14.11	21.05
Konstruktionsszenario 4*	Σ GWP, GEG [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	6.50	3.33	20.27	30.10
(Neubau Stahlbeton, PV & Wärmepumpe)	Σ GWP, Ausblick [kgCO ₂ e/m ² EBFa]	6.50	1.91	1.92	10.33

Tabelle 11 Gegenüberstellung der flächenspezifischen kumulierten GWP's unterteilt in Konstruktion, Anlagentechnik und des Energiebedarfs des Referenzgebäudes, der drei Konstruktionsvarianten und einem weiteren Szenario

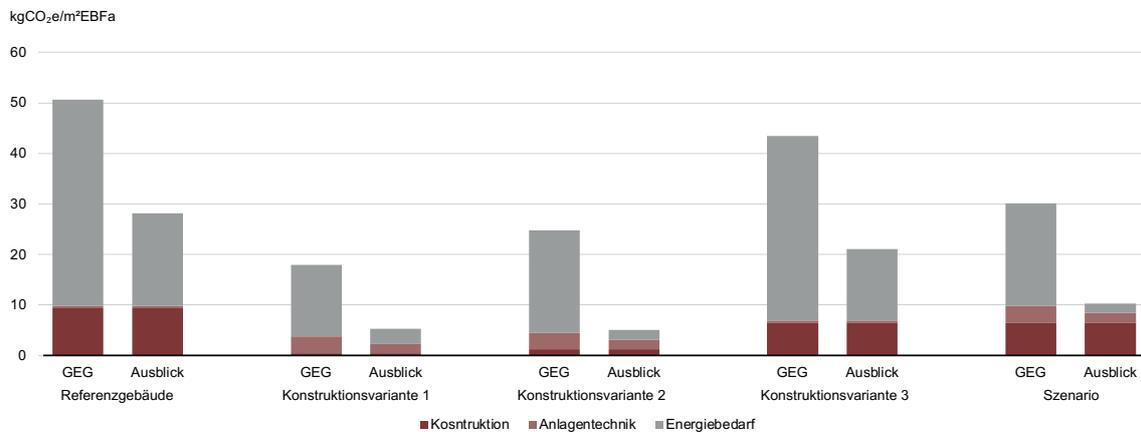


Abbildung 55 Gegenüberstellung der flächenspezifischen kumulierten GWP's unterteilt in Konstruktion, Anlagentechnik und des Energiebedarfs des Referenzgebäudes, der drei Konstruktionsvarianten und einem weiteren Szenario

6.3 Rückbezug auf die Forschungsfrage

Durch den Vergleich unterschiedlicher Konstruktionsvarianten des Entwurfes zur Umnutzung des Parkhauses zu einem Wohn- und Geschäftsgebäude wurde ersichtlich, in welchem Maß die Wirkabschätzung auf ökologischer Ebene beeinflusst werden kann. Diese Arbeit hat aufgezeigt, dass durch die Nutzung des Bestandes das höchste Kreislaufpotenzial der Materialien mit einem Urban-Mining-Indicator in der Höhe von 79,0 % erreicht werden kann.

Durch die Verwendung von Holz als Baumerial und dem Einsatz von regenerativen Energietechniken kann das GWP bei gleicher Qualität der Gebäudehülle im Vergleich zu einer herkömmlichen Bauweise mit fossilen Brennstoffen und ohne Photovoltaik in der Gesamtbetrachtung schon mit heutigen Annahmen der Emissionsfaktoren einen Unterschied mit dem Faktor von 2,6 ausmachen (36,6 kgCO₂e/m²EBFa zu 14,3 kgCO₂e/m²EBFa). Dieser Faktor würde sich durch die Dekarbonisierung der Energieversorgung durch den Ausbau von regenerativen Energien noch weiter verbessern.

Aufgrund der Berücksichtigung der strategischen Faktoren, wie beispielsweise der Flächeneffizienz und der Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit des Entwurfes konnten weitere relevante Parameter bei der Nachhaltigkeitsbewertung mit aufgenommen und bilanziert werden.

6.4 Ausblick des Forschungsgebietes

Diese Arbeit hat aufgezeigt, wie eine Ökobilanzierung eines Gebäudes mit dem aktuellem Stand der Technik auch in einem begrenzteren Rahmen in einer Entwurfsphase des Bilanzierungsgebäudes durchgeführt werden kann. Zertifizierungssysteme entwickeln sich außerdem immer weiter und passen sich den aktuellen Erkenntnissen, Trends und Entwicklungen an (vgl. Kapitel 2.8 „Bewertungs- und Zertifizierungssysteme im Vergleich“, Seite 21 ff.)

Ein potenzieller Ausblick des Forschungsgebietes wäre es, wenn auf wissenschaftlicher Grundlage die Fragestellung erforscht wird, wie die Akzeptanz des nachhaltigen Bauens in der Gesellschaft gesteigert werden kann. Während aktuell noch aufgrund von höheren Baukosten des recyclinggerechten Bauens⁴² nach wie vor auf konventionelle Bauweisen gesetzt wird, sollte das Bewusstsein des nachhaltigen Bauens in der Gesellschaft gesteigert werden, um die Erkenntnisse aus der Wissenschaft und der Forschung auch tatsächlich umsetzen zu können. Dies reicht dabei von der gesellschaftlichen Akzeptanz bis hin zu politisch gesetzten Rahmenbedingungen.

42 Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Kostenvergleich konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen, Seite 120 ff.

7 Fazit

Die vorliegende Arbeit verdeutlicht die zunehmende Bedeutung und Notwendigkeit, Bauprojekte unter der Berücksichtigung ökologischer Aspekte zu planen und umzusetzen.

Durch die Analyse verschiedener Konstruktionsvarianten des Entwurfes der Transformation des Parkhauses am Carlsplatz in Düsseldorf wird deutlich, dass durch die Nutzung der bereits existierenden Strukturen der gebauten Umwelt den Ressourcenbedarf an Primärrohstoffen im Bauwesen deutlich verkleinert und das Kreislaufpotenzial der Materialien vergrößert. Recyclingfreundliche Baumaterialien und eine ressourcenschonende Bauweise durch die Nutzung der Bestandskonstruktion tragen dazu bei, den ökologischen Fußabdruck des Gebäudeentwurfes der Transformation zu minimieren.

Eine thermische Gebäudehülle mit hoher Dämmqualität in der Kombination mit der Integration von regenerativen Energien in den Gebäudeentwurf durch die Installation einer Photovoltaikanlage auf der Liegenschaft des Gebäudes ist von entscheidender Bedeutung, um den Emissionsausstoß während der Nutzungsphase zu reduzieren.

Diese Arbeit zeigt jedoch ebenfalls auf, dass äußere Einflüsse den Emissionsausstoß des Gebäudes stark beeinflussen. Durch den geringen Heizbedarf des Gebäudes - resultierend aus der gut gedämmten thermischen Gebäudehülle - steigt in Relation die Bedeutung des Emissionsausstoßes des Allgemeinstrombedarfs. Nur eine Dekarbonisierung des Stromnetzes durch den Ausbau regenerativer Energien kann den Emissionsausstoß des Allgemeinstrombedarfes nutzerunabhängig reduzieren. Hierbei ist die vollständige Eliminierung des Einsatzes fossiler Energieträger innerhalb des Gebäudes eine notwendige Voraussetzung, um diesen Effekt in seiner Gesamtheit zu maximieren.

Durch ein aufgezeigtes Zukunftsszenario mit einem geringen Emissionsfaktor der Energieversorgung wurde verdeutlicht, dass der Emissionsausstoß der Bauwerkskonstruktion an Relevanz gegenüber des Emissionsausstoßes des Energiebedarfes steigt. Für die Minimierung des Emissionsausstoßes des Gebäudeentwurfes ist eine umfassende und integrale Betrachtung der Energieversorgung über die Nutzungsphase des Gebäudes in der Kombination mit der Art der Baukonstruktion also unabdingbar.

Insgesamt unterstreicht die vorliegende Arbeit die Dringlichkeit, nachhaltiges und recyclinggerechtes Bauen als integralen Bestandteil der Planung und Umsetzung von Bauprojekten zu betrachten. Nur durch die konsequente Integration nachhaltiger Prinzipien und Praktiken innerhalb des Gebäude- und Bausektors kann dieser einen Beitrag dazu leisten, dem menschengemachten Klimawandel und dem ausufernden Bedarf an Primärrohstoffen erfolgreich entgegen zu wirken.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] tagesschau - Verkehr in deutschen Städten wird immer zäher, 2024
<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/stau-hamburg-berufsverkehr-pendeln-grossstadt-verkehr-100.html> [Zugriff 10.01.2024]
- [2] Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, (... zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor), Brüssel 2014
- [3] Statistisches Bundesamt, Abfallbilanz, Wiesbaden, verschiedene Jahrgänge
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> [Zugriff am 27.02.2024]
- [4] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division
https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/technical/TP2011-3_SevenBillionandGrowing.pdf [Zugriff am 27.12.2023]
- [5] Pestel Institut gGmbH 2023 - Bauen und Wohnen in der Krise Aktuelle Entwicklungen und Rückwirkungen auf Wohnungsbau und Wohnungsmärkte
<https://bauen-und-wohnen-in-deutschland.de/wp-content/uploads/2023/01/Studie-Bauen-und-Wohnen-in-der-Krise.pdf>, [Zugriff am 18.11.2023]
- [6] Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023
https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_N041_31.html#:~:text=Rein%20rechnerisch%20hatte%20eine%20Person,rund%2037%20%25%20binnen%2030%20Jahren [Zugriff am 18.11.2023]
- [7] Handelsblatt - Mietpreise in Deutschland: In diesen Städten sind die Mieten pro Quadratmeter am höchsten
<https://www.handelsblatt.com/finanzen/immobilien/mietpreise-in-deutschland-in-diesen-staedten-sind-die-mieten-pro-quadratmeter-am-hoechsten/25430390.html> [Zugriff am 18.11.2023]
- [8] Schürmann, M et al - Coworking Space, Geschäftsmodell für Entrepreneure und Wissensarbeiter
- [9] eascy - die fünf Dimensionen der automobilen Transformation
https://www.pwc.de/de/automobilindustrie/pwc_automotive_eascy-studie.pdf [Zugriff am 14.01.2024]

- [10] Club of Rome - Die Grenzen des Wachstums
<https://clubofrome.de/die-grenzen-des-wachstums/>, [Zugriff am 24.12.2023]
- [11] Global Footprint Network
<https://overshoot.footprintnetwork.org> [Zugriff am 14.01.2023]
- [12] IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/07/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf,
[Zugriff am 25.12.2023]
- [13] World Resources Institute, Climate Watch Historical GHG Emissions (1990-2020)
<https://data.worldbank.org/indicator/en.atm.ghgt.kt.ce> [Zugriff am 24.12.2023]
- [14] Hegger, M. et al., 2012 - EcoEasy Abschlussbericht, Seite 1
- [15] Hillebrandt, A. et al. - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Rückbau, Verwertung und Entsorgung im Bauwesen, Seite 22
- [16] Özdemir, Ö et al - Nachhaltigkeit und Klimaschutz im Hochbau - vom Energieverbrauch in der Nutzung zur Lebenszyklusanalyse, in: 2023 Bauphysik Kalender: Nachhaltigkeit, Seite 3
- [17] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2019) - Klimaschutzbericht 2019 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzbericht_2019_kabinettsfassung_bf.pdf [Zugriff am 25.12.2023]
- [18] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
<https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700> [Zugriff am 14.01.2024]
- [19] Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechtes für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze vom 8. August 2020 (Gebäudeenergiegesetz - GEG)
- [20] DIN EN 15978:2012-10

- [21] DIN EN 15643 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden
- [22] DIN EN 15978:2012-10
<https://www.beuth.de/de/norm/din-en-15978/164252701m> [Zugriff am 14.12.2023]
- [23] Hillebrandt, A. et al. - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Bewertungssysteme im Überblick, Seite 29
- [24] Rosen, A. et al - Urban Mining Design in der Praxis - in: Detail, Kreislaufwirtschaft 11.2022, Seite 84
- [25] Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Recyclingpotenziale von Baustoffen, Seite 64
- [26] Hegger, M. et al., 2012 - EcoEasy Abschlussbericht, Seite 2 ff.
- [27] Betonherstellung und Klimaschutz
<https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/betonherstellung-und-klimaschutz-7229519> [Zugriff am 24.12.2023]
- [28] The Dreyer Foundation - Guide to Sustainable Building Certifications - <https://gxn.3xn.com/wp-content/uploads/sites/4/2018/08/Guide-to-Green-Building-Certifications-August-2018-weblow-res.pdf> [Zugriff am 23.12.2023]
- [29] Market Focus 2023 - Investmentmarkt Green Buildings
<https://www.realestate.bnpparibas.de/marktberichte/investmentmarkt/deutschland-market-focus> [Zugriff am 15.12.2023]
- [30] Informationsportal Qualitätssiegel Nachhaltiges Bauen
<https://www.qng.info/#> [Zugriff am 15.12.2023]
- [31] Informationsportal Nachhaltiges Bauen
<https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/beg/> [Zugriff am 15.01.2023]
- [32] Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Recyclingpotenziale von Baustoffen, Seite 96 ff.

- [33] Netzgesellschaft Düsseldorf mbH - Fernwärmeprojekt Benrath und Holthausen
<https://www.netz-duesseldorf.de/unsere-infrastruktur/fernwaerme/fernwaerme-ausbau-benrath-holthausen/> [Zugriff am 20.01.2024]
- [34] Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechtes für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze vom 8. August 2020 (Gebäudeenergiegesetz - GEG) Anlage 9, Tabelle 3
- [35] bwp (Bundesverband Wärmepumpe e.V.)
<https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/57-der-im-jahr-2022-gebauten-wohngebaeude-heizen-mit-waermepumpen/#:~:text=Wärmepumpen%20wurden%20im%20Jahr%202022,bei%2031%2C4%20%25%20gelegen.> [Zugriff am 20.01.2024]
- [36] Romina Risetto, Andreas Wagner, Karsten Voss, Tjado Voß, Marvin Kaliga - Deck-in-Vent: Entwicklung und Demonstration deckenintegrierter Ventilatoren im Rahmen der Gebäudesanierung des Landratsamtes Dillingen, S. 161
- [37] Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Recyclingpotenziale metallischer Materialien, S. 61
- [38] Rat der Europäischen Union - „Fit für 55“, <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> [Zugriff am 26.02.2024]
- [39] Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2021/2221_ISE_d_PI_CO2-Fussabdruck-von-PV-Modulen.pdf [Zugriff am 26.02.2024]
- [40] Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau - Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf [Zugriff am 26.02.2024]
- [41] Electricity Maps
<https://app.electricitymaps.com/map> [Zugriff am 26.02.2023]
- [42] Hillebrandt, A. et al - Atlas Recycling, Gebäude als Materialressource - Kostenvergleich konventioneller und recyclinggerechter Konstruktionen, Seite 120 ff.

Anhang



Schwarzplan

M ~1:10.000

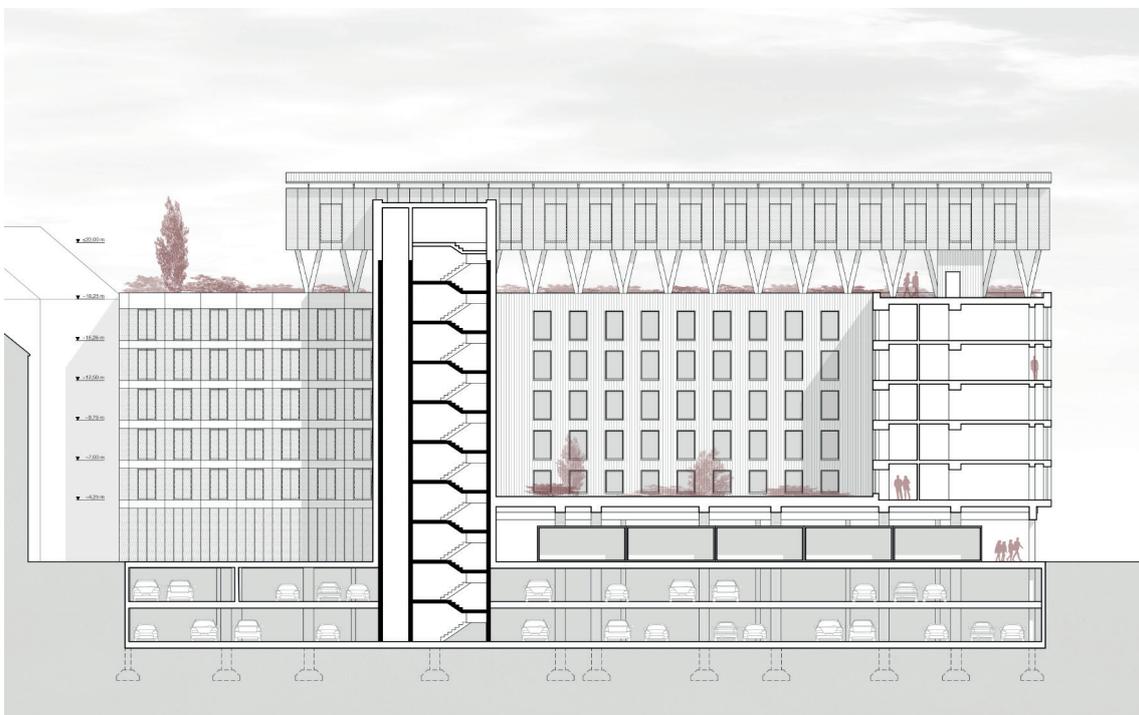


Rendering



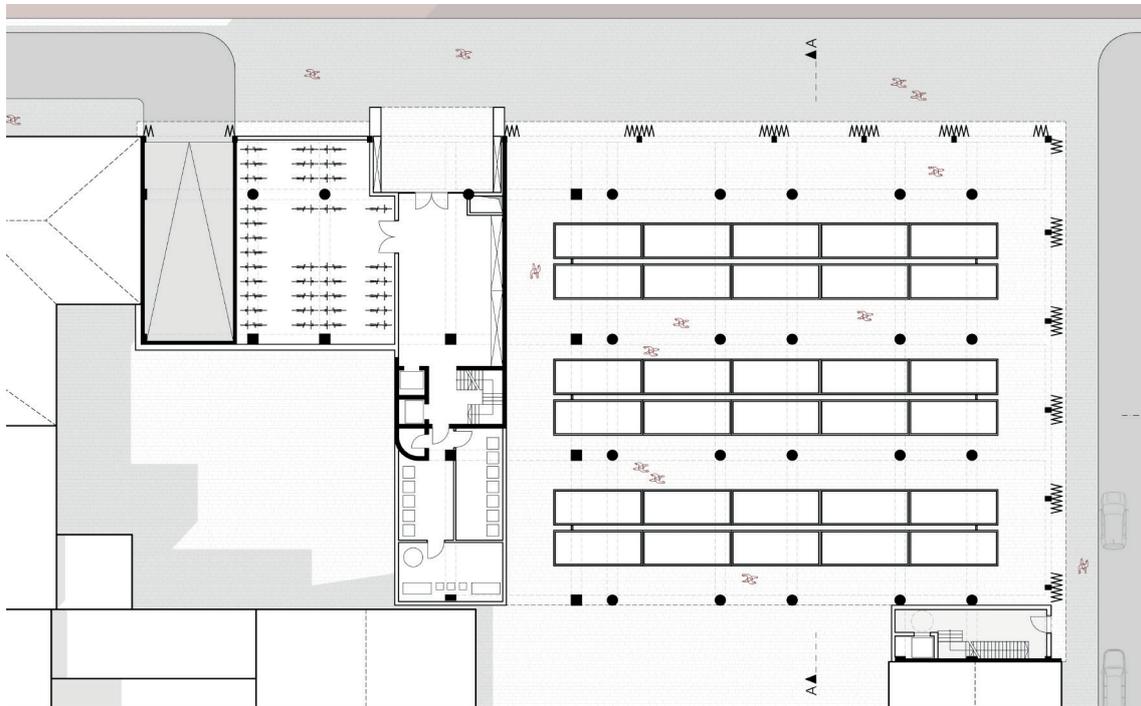
Ansicht Ost

M ~1:500



Längsschnitt

M ~1:500



Grundriss Erdgeschoss

M ~1:500



Grundriss 1. Obergeschoss

M ~1:500



Grundriss 2. Obergeschoss

M ~1:500



Grundriss 3. Obergeschoss

M ~1:500



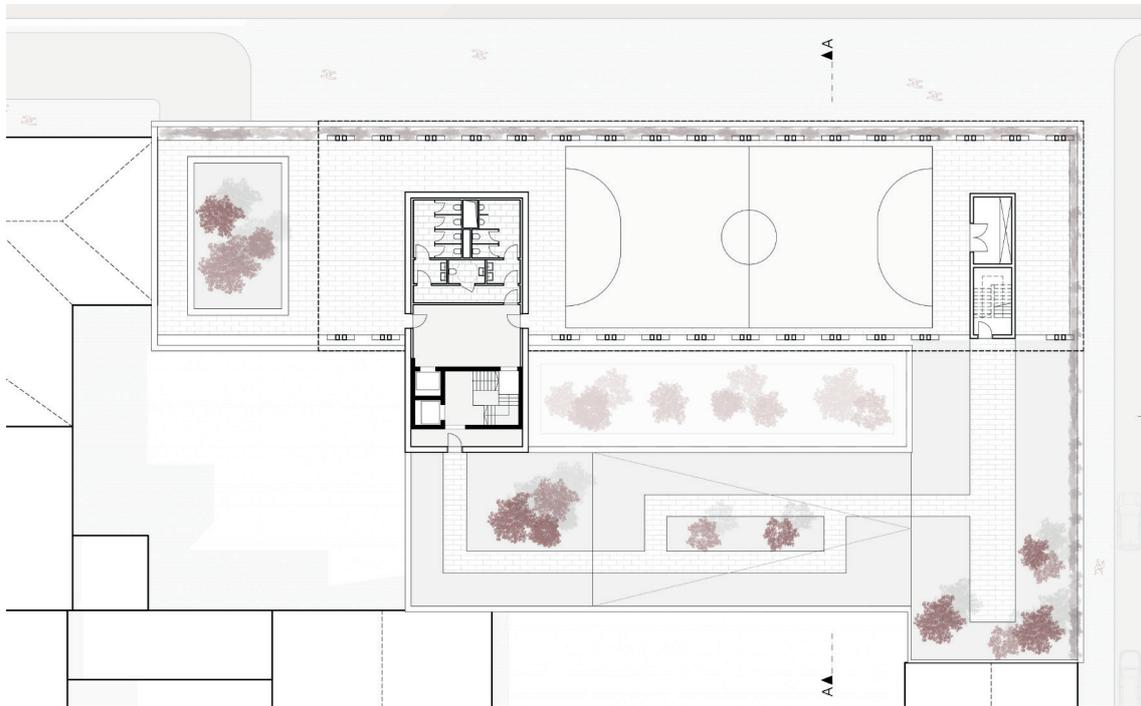
Grundriss 4. Obergeschoss

M ~1:500



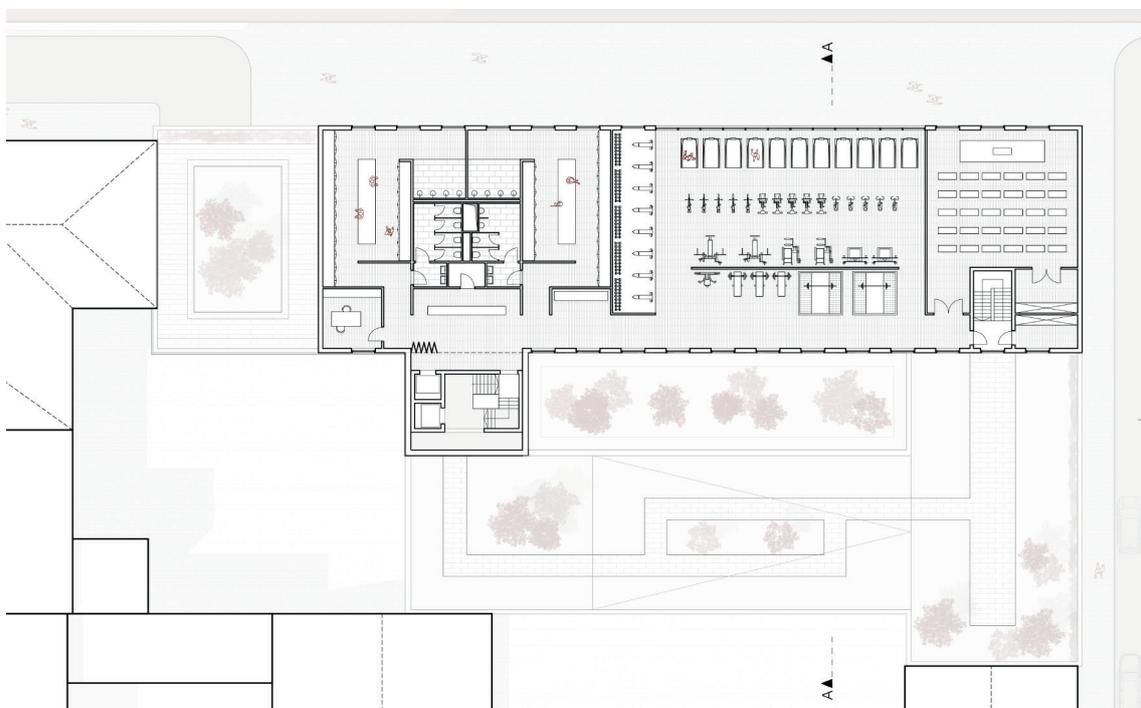
Grundriss 5. Obergeschoss

M ~1:500



Grundriss 6. Obergeschoss (Dachfläche vom Bestand)

M ~1:500



Grundriss 7. Obergeschoss (Aufstockung)

M ~1:500

Nettogrundfläche	10986 m ²
davon Energiebezugsfläche	6788 m ²
davon Wohnen	3107 m ²
davon Büro	2136 m ²
davon Fitness	774 m ²
davon Gastronomie	771 m ²
davon Parken	4198 m ²
Fassadenfläche	4286 m ²
davon Nord	1514 m ²
davon Außenwand	771 m ²
davon Fenster	743 m ²
davon Ost	788 m ²
davon Außenwand	577 m ²
davon Fenster	211 m ²
davon Süd	1362 m ²
davon Außenwand	950 m ²
davon Fenster	412 m ²
davon West	622 m ²
davon Außenwand	586 m ²
davon Fenster	36 m ²
Dachfläche	2433 m ²
Boden gegen Außenluft	2433 m ²
Gebäudevolumen	28349 m ³
Fläche Photovoltaik	972.4 m ²

Aufteilung der Flächenverhältnisse

Group	Component	Type	Reference Unit	in kg of CO2-equivalents			in years
				Production	Use Phase	End-of-Life	lifetime
Electric Equipment	Cables, RES Buildings	0.75 mm2	100 m2 conditioned net floor area	125	0	-	50
Water Supply	Water Supply System RES Buildings	Steel	100 m2 conditioned net floor area	60	0	not included	30
		Copper		71	0	not included	30
		Plastics		8	0	not included	30
Ventilation Systems	Centralized with heat exchange	steel ducts	100 m2 conditioned net floor area	1845	123	1	50
		PE ducts		1250	135	1	50
	De-centralized	steel ducts		3100	123	1	50
		PE ducts		1450	135	1	50
Photovoltaics	Flat-Roof	multi-Si	1 kWPEAK PV module	2124	not included	not included	25
		single-Si		2476	not included	not included	25
		multi-Si		1939	not included	not included	25
	Slanted-Roof	single-Si		2302	not included	not included	25
		a-Si		1572	not included	not included	25
		Battery		lead-acid	1 kWh of storage	52	not included
Solar Collectors	Collector	lithium-ion	169	not included	not included	25	
		flat-plate excavated	1 m2 of collector	114	not included	not included	25
	Water tank	all types	1,000 litre of tank	93	not included	not included	25
Pumping and Installation	all types	1 m2 of collector	40	not included	not included	25	

GWP der Anlagentechnik, Quelle: Solar Decathlon Europe 21/22

Projekt	Parkhaus am Carlsplatz		
Variante	Konstruktionsvariante 1		
Datum	01.02.24		
Energiebezugsfläche	A	6788	m ²
Lebenszyklus	n	50	a
Nutzung 1 des Gebäudes	Wohnen		3107
Nutzung 2 des Gebäudes	Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude		2136
Nutzung 3 des Gebäudes	Gastronomie		774
Nutzung 4 des Gebäudes	Sportgebäude		771
			Fläche (NGF)
			m2
			Flächenverhältnis
			0.46
			0.31
			0.11
			0.11

URBAN MINING INDICATOR

Urban Mining Indikator Faktor	f _{UMI}	0.79	-	= UMI / 100
Urban Mining Indikator	UMI	79.0	%	UMI-Tool

GLOBAL WARMING POTENTIAL

GWP Faktor	f _{GWP}	0.64	-	= 1 - (GWP / GWP _{Ref})
Global Warming Potential	GWP	18.01	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{K,50+AT,50} + GWP _N
Global Warming Potential Referenzgebäude	GWP _{Ref}	50.66	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{Ref,K,50+AT,50} + GWP _{Ref,N}

GWP Konstruktion und Anlagentechnik	GWP _{K,50+AT,50}	3.73	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{K,50} + GWP _{AT,50}
Summe des GWP's der Konstruktion	GWP _{K,tot}	135760	kgCO ₂ e	UMI-Tool
spezifisches GWP der Konstruktion	GWP _{K,50}	0.40	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{K,tot} / A * n
GWP der Elektroinstallationen	GWP _{AT,el,50}	0.03	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
Leitungssystem der Wasserversorgung	Kupfer			Ausführungsunterlagen
GWP des Leitungssystems	GWP _{AT,DHW,50}	0.02	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
Leitungssystem der Lüftungsanlage	Zentral, Stahlleitungen			Ausführungsunterlagen
GWP der Lüftungsanlage	GWP _{AT,vent,50}	0.39	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
Photovoltaikmodule	Flachdach, Monokristallin			Ausführungsunterlagen
Fläche der PV-Module	A _{PV}	972.4	m ²	Entwurfspläne
GWP der Photovoltaik	GWP _{AT,PV,50}	2.84	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
Batterie Speichersystem	Lithiumionen Batterie			Ausführungsunterlagen
Größe des Batteriespeichers	K _{apBatt}	50	kWh	Ausführungsunterlagen
GWP des Batteriespeichers	GWP _{AT,Batt,50}	0.05	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
GWP der Anlagentechnik	GWP _{AT,50}	3.33	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{AT,el,50} + GWP _{AT,DHW,50} + GWP _{AT,vent,50} + GWP _{AT,PV,50} + GWP _{AT,Batt,50}
GWP Nutzung	GWP _N	14.28	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{Heiz} + GWP _{Strom} - GWP _{PV}
Endenergiebedarf Heizen	Q _{E,Heiz}	26.7	kWh/m ² a	EnerCalc
Endenergiebedarf Warmwasser	Q _{E,DHW}	18.80	kWh/m ² a	EnerCalc
Summe Heizen und Warmwasser	Q _{E,Heiz+DHW}	45.50	kWh/m ² a	= Q _{E,Heiz} + Q _{E,DHW}
Brennstoff	Nah-/Fernwärme KWK erneuerbar			Ausführungsunterlagen
CO ₂ -Faktor	f _{CO2e}	40	gCO ₂ /kWh	GEG
GWP Heiz	GWP _{Heiz}	1.82	kgCO ₂ e/m ² a	= Q _{E,Heiz+DHW} * f _{CO2e}
Allgemeinstrombedarf	Q _{E,Strom}	37.50	kWh/m ² a	dena, "Fit für 2045: Zielparameter für Nichtwohngebäude im Bestand"
Strombedarf Lüftung	Q _{E,Lüftung}	6.10	kWh/m ² a	EnerCalc
Strombedarf Hilfsenergie	Q _{E,Hilfsenergie}	0.70	kWh/m ² a	EnerCalc
Summe Strombedarf	Q _{E,Strom+Lüftung+Hilfsenergie}	44.30	kWh/m ² a	= Q _{E,Strom} + Q _{E,Lüftung} + Q _{E,Hilfsenergie}
GWP Strom	GWP _{Strom}	24.81	kgCO ₂ e/m ² a	= Q _{E,Strom+Lüftung+Hilfsenergie} * f _{CO2,Strommix}
Solare Einstrahlung	Q _{SolarRadiation}	935448.8	kWh/a	ClimateStudio
Wirkungsgrad	η	20	%	in Abhängigkeit der Art der Photovoltaikmodule
Performance Ratio	φ	80	%	Literaturwert
Energiebereitstellung durch PV	Q _{E,gen,tot,PV}	149672	kWh/a	= Q _{SolarRadiation} * η * φ
flächenspezifische Energiebereitstellung	Q _{E,gen,PV}	22.05	kWh/m ² a	= Q _{E,gen,tot,PV} / A
Negativemissionen durch Energiebereitstellung	GWP _{PV}	12.35	kgCO ₂ e/m ² a	= Q _{E,gen,PV} * f _{CO2,Verdrängungsstrom}
GWP Ref Konstruktion und Anlagentechnik	GWP _{Ref,K,50+AT,50}	9.84	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{K,tot} / n / A + GWP _{AT,50} / n
spezifisches GWP der Konstruktion	GWP _{Ref,K,50}	9.40	kgCO ₂ e/m ² a	DGNB Referenzwert
GWP Ref der Elektroinstallationen	GWP _{Ref,AT,el,50}	0.03	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
GWP Ref des Leitungssystems	GWP _{Ref,AT,DHW,50}	0.02	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
GWP Ref der Lüftungsanlage	GWP _{Ref,AT,vent,50}	0.39	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
GWP Ref der Anlagentechnik	GWP _{Ref,AT,50}	0.44	kgCO ₂ e/m ² a	Tabellenwerk
Endenergiebedarf Ref Heizen	Q _{Ref,E,Heiz}	44.5	kWh/m ² a	EnerCalc
Endenergiebedarf Ref Warmwasser	Q _{Ref,E,DHW}	22.20	kWh/m ² a	EnerCalc
Summe Ref Heizen und Warmwasser	Q _{Ref,E,Heiz+DHW}	66.70	kWh/m ² a	= Q _{E,Heiz} + Q _{E,DHW}
CO ₂ -Faktor	f _{CO2e}	240	gCO ₂ /kWh	Erdgas, GEG
GWP Ref Heiz	GWP _{Ref,Heiz}	16.01	kgCO ₂ e/m ² a	= Q _{Ref,E,Heiz+DHW} + f _{CO2e}
GWP Ref Allgemeinstrombedarf	GWP _{Ref,Strom}	24.81	kgCO ₂ e/m ² a	dena, "Fit für 2045: Zielparameter für Nichtwohngebäude im Bestand"
Strombedarf Lüftung	6.10	kWh/m ² a	EnerCalc	
Strombedarf Hilfsenergie	0.70	kWh/m ² a	EnerCalc	
GWP Lüftung+Hilf	6.49	kgCO ₂ e/m ² a	Summe GWP Strombedarf Lüftung und Hilfsenergie	
GWP Ref Nutzung	GWP _{Ref,N}	40.82	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{Ref,Heiz} + GWP _{Ref,Strom}
GWP Ref	GWP _{Ref}	50.66	kgCO ₂ e/m ² a	= GWP _{Ref,N} + GWP _{Ref,K,50+AT,50}

STRATEGISCHE INDIKATOREN				
Faktor der strategischen Indikatoren	f _{strat}	0.84	-	= $\sum_{strat} / 100$
Summe strategische Indikatoren	\sum_{strat}	83.99	Punkte	
Flächeneffizienz Nutzung 1				
Nettogrundfläche	NGF	3107	m ²	Entwurfspläne
Bruttogrundfläche	BGF	4161.45	m ²	Entwurfspläne
Flächenverhältnis	NGF/BGF	0.75	-	= NGF/BGF
Faktor x	x	0.60	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Faktor y	y	0.80	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Flächeneffizienz maximal erreichbare Punkte		9.15	Punkte	
Flächeneffizienz erreichte Punkte		6.71	Punkte	
Flächeneffizienz Nutzung 2				
Nettogrundfläche	NGF	2136	m ²	Entwurfspläne
Bruttogrundfläche	BGF	2303.96	m ²	Entwurfspläne
Flächenverhältnis	NGF/BGF	0.93	-	= NGF/BGF
Faktor x	x	0.48	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Faktor y	y	0.75	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Flächeneffizienz maximal erreichbare Punkte		6.29	Punkte	
Flächeneffizienz erreichte Punkte		6.29	Punkte	
Flächeneffizienz Nutzung 3				
Nettogrundfläche	NGF	774	m ²	Entwurfspläne
Bruttogrundfläche	BGF	826	m ²	Entwurfspläne
Flächenverhältnis	NGF/BGF	0.94	-	= NGF/BGF
Faktor x	x	0.50	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Faktor y	y	0.70	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Flächeneffizienz maximal erreichbare Punkte		2.28	Punkte	
Flächeneffizienz erreichte Punkte		2.28	Punkte	
Flächeneffizienz Nutzung 4				
Nettogrundfläche	NGF	771	m ²	Entwurfspläne
Bruttogrundfläche	BGF	829.91	m ²	Entwurfspläne
Flächenverhältnis	NGF/BGF	0.93	-	= NGF/BGF
Faktor x	x	0.70	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Faktor y	y	0.90	-	Faktor in Abhängigkeit der Nutzung
Flächeneffizienz maximal erreichbare Punkte		2.27	Punkte	
Flächeneffizienz erreichte Punkte		2.27	Punkte	
Maximal erreichbare Punkte		20	Punkte	
Summe Punkte Flächeneffizienz		17.56	Punkte	
Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit				
Frage 1		ja		Fragenkatalog
Frage 2		nein		Fragenkatalog
Frage 3		ja		Fragenkatalog
Frage 4		ja		Fragenkatalog
Maximal erreichbare Punkte		20		
Summe P Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit		15		
Flächeninanspruchnahme				
neu versiegelte Fläche		0	m ²	Entwurfspläne
Gebäudenutzfläche		6788	m ²	Entwurfspläne
Flächeninanspruchnahme		0	-	Entwurfspläne
maximal erreichbare Punkte		20		
erreichte Punkte		20		
Mobilitätsinfrastruktur				
Frage 1		ja		Fragenkatalog
Frage 2		ja		Fragenkatalog
Frage 3		ja		Fragenkatalog
Frage 4		ja		Fragenkatalog
Maximal erreichbare Punkte		20		
Summe P Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit		20		
Biodiversität				
Grundstücksfläche		2166.72	m ²	Entwurfspläne
Teilversiegelte Flächen		0	m ²	Entwurfspläne
Halboffene Flächen		0	m ²	Entwurfspläne
Vegetationsflächen, <80 cm Bodenauftrag		0	m ²	Entwurfspläne
Vegetationsflächen, >80 cm Bodenauftrag		0	m ²	Entwurfspläne
Vegetationsflächen, anstehender Boden		303.02	m ²	Entwurfspläne
Dachbegrünung		1336.62	m ²	Entwurfspläne
Vertikalbegrünung		0	m ²	Entwurfspläne
Σ [(Teilflächen [m ²] × spez. Biotopflächenfaktoren [-]) objektbezogenen Biotopflächenfaktors		1238.654	m ²	Formel in Anlehnung an DGNB Zertifizierungssystem
		0.57167239		= Grundstücksfläche / Dachbegrünung
Maximal erreichbare Punkte		20		
Summe P Biodiversität		11.43344779		

Screenshot des Excel-Tools der Konstruktionsvariante 1

Nummer	Kategorie	Energieträger	Emissionsfaktor [g CO ₂ -Äquivalent pro kWh]
1	Fossile Brennstoffe	Heizöl	310
2		Erdgas	240
3		Flüssiggas	270
4		Steinkohle	400
5		Braunkohle	430
6	Biogene Brennstoffe	Biogas	140
7		Biogas, gebäudenah erzeugt	75
8		Biogenes Flüssiggas	180
9		Bioöl	210
10		Bioöl, gebäudenah erzeugt	105
11		Holz	20
12	Strom	netzbezogen	560
13		gebäudenah erzeugt (aus Photovoltaik oder Windkraft)	0
14		Verdrängungsstrommix	860
15	Wärme, Kälte	Erdwärme, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme	0
16		Erdkälte, Umgebungskälte	0
17		Abwärme aus Prozessen	40
18		Wärme aus KWK, gebäudeintegriert oder gebäudenah	nach DIN V 18599-9: 2018-09
19		Wärme aus Verbrennung von Siedlungsabfällen (unter pauschaler Berücksichtigung von Hilfsenergie und Stützfeuerung)	20
20	Nah-/Fernwärme aus KWK mit Deckungsanteil der KWK an der Wärmeerzeugung von mindestens 70 Prozent	Brennstoff: Stein-/Braunkohle	300
21		Gasförmige und flüssige Brennstoffe	180
22		Erneuerbarer Brennstoff	40
23	Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	Brennstoff: Stein-/Braunkohle	400
24		Gasförmige und flüssige Brennstoffe	300
25		Erneuerbarer Brennstoff	60

Emissionsfaktoren, Quelle: GEG Anlage 8, Tabelle 3

Concular Home Projekte ▾ Alle Produkte Kategorien ▾ Ankauf Beschaffung Kontakt 🔍 👤 📧 📌

[Startseite](#) > [Projekte](#) > [Solar-Produktionsfabrik Berlin Adlershof](#) > Wellblech 6250x1000x1

CONCULAR - NACHHALTIGE & ZIRKULÄRE BAUMATERIALIEN KAUFEN

Wellblech 6250x1000x1

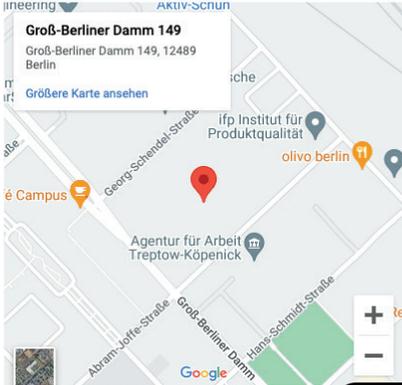
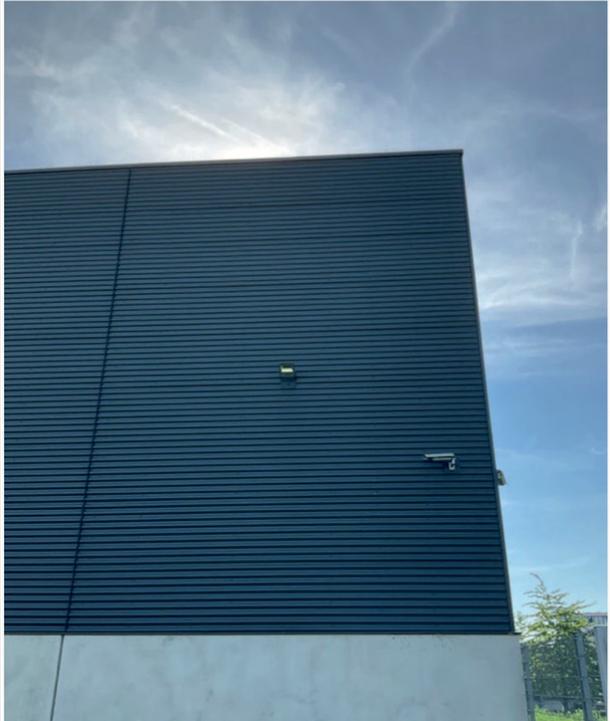
Preis nach Anfrage
inkl. MwSt.

Anzahl

- 1 +

436 auf Lager

Anfrage stellen



Engineering ▾ **AKTIV-SCHUN**

Groß-Berliner Damm 149
Groß-Berliner Damm 149, 12489
Berlin

Größere Karte ansehen

ifp Institut für Produktqualität

olivo berlin

Agentur für Arbeit Treptow-Köpenick

Abraham-Jaffee-Straße

Groß-Berliner Damm

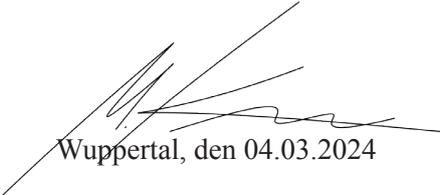
Hans-Schmidt-Straße

Google

Wellblechmaterial der Konstruktionsvariante 1, Quelle: Concular [Zugriff am 28.12.2023]

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Transformation urbaner Räume, aus Parkraum wird Lebensraum - Nachhaltigkeitsbewertung im Hochbau auf ökologischer Ebene an dem Beispiel einer Umnutzung und Aufstockung des Parkhauses am Carlsplatz in Düsseldorf“ selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die den verwendeten Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



Wuppertal, den 04.03.2024



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Marvin Kaliga

Matrikel-Nr.: 1623432