

BBSR-
Online-Publikation
51/2025

Q-LCA

Analyse der ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Siedlungstypen in Neubauquartieren über ihren Lebenszyklus

von

Prof. Dr. Michael Prytula
Prof. Tim Rieniets
Dr. Joachim Rosenberger
Jana Hack
Luzia Stallmann
Niclas Gebhardt



Q-LCA

Analyse der ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Siedlungstypen in Neubauquartieren über ihren Lebenszyklus

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.28

Projektlaufzeit: 11.2022 bis 04.2025

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuerin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Verena Kluth
verena.kluth@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Fachhochschule Potsdam
Prof. Dr. Michael Prytula
michael.prytula@fh-potsdam.de

Leibniz Universität Hannover
Prof. Tim Rieniets
rieniets@staedtebau.uni-hannover.de

Dr. Joachim Rosenberger
Jana Hack, M. Sc.
Luzia Stallmann, B. Sc.
Niclas Gebhardt, M. Sc.

Redaktion

Fachhochschule Potsdam
Prof. Dr. Michael Prytula

Stand

Oktober 2025

Gestaltung

Fachhochschule Potsdam
Luzia Stallmann (Satz)

Leibniz Universität Hannover
Dr. Joachim Rosenberger (Grafik)

Bildnachweis

Titelbild: Dr. Joachim Rosenberger

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Prytula, M.; Rieniets, T.; Rosenberger, J.; Hack, J.; Stallmann, L.; Gebhardt, N., 2025: Q-LCA: Analyse der ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Siedlungstypen in Neubauquartieren über ihren Lebenszyklus. BBSR-Online-Publikation 51/2025. Bonn.
<https://doi.org/10.58007/f371-1157>

DOI 10.58007/f371-1157

ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
1. Untersuchungsgegenstand und Projektziele	10
1.1 Themenfeld und Untersuchungsgegenstand	10
1.2 Entwicklungsbedarfe	11
1.3 Projektziele	11
2. Problemstellung - Stand der Forschung	13
2.1 Bestandserhebung und Typisierung von Neubausiedlungen	14
2.2 Erhebung und Bewertung urbaner Stoffströme auf der Makroebene	14
2.3 Lebenszyklusanalysen und Stoffströme von Gebäuden	18
2.4 Lebenszyklusanalysen und Stoffströme von Quartieren und Infrastrukturen	20
2.5 Energiesystemmodelle für die Wärmeversorgung	22
2.6 Ansätze zu einer sektorübergreifenden Quartiersbilanzierung	25
2.7 Bilanzierungswerkzeuge zur Ermittlungen der Umweltwirkungen von Quartieren	28
2.8 Zusammenfassung und weitere Forschungserfordernisse	32
3. Forschungsdesign	33
3.1 Arbeitshypothesen	33
3.2 Forschungsfragen	33
3.3 Methodischer Ansatz	34
3.3.1 Methodologische Einordnung des Forschungsprojekts	34
3.3.2 Vorgehensweise und Methoden	35
3.3.3 Methoden- und Datenkritik	43
3.4 Projektteam, Kooperationspartner und Arbeitsorganisation	43
4. Empirische Erhebung des Siedlungsgeschehens in Deutschland	45
4.1 Methodik zur Erhebung des Siedlungsgeschehens	45
4.2 Ergebnisse der Erhebung des Siedlungsgeschehens	47
4.2.1 Lagemerkmale	47
4.2.2 Städtebauliche Strukturmerkmale	50
4.3 Auswertung	53
4.3.1 Lagemerkmale	53
4.3.2 Städtebauliche Strukturmerkmale	54
4.3.3 Zusammenhänge zwischen Lage- und Strukturmerkmalen	57
5. Morphologische Modellierung der Siedlungsstrukturen	59
5.1 Methodik	59
5.2 Modellierung von Siedlungssegmenten	60
5.2.1 Gebäudetypen	60
5.2.2 Erschließungstypen und deren Verkehrsflächen	63
5.2.3 Bauliche Dichten	65
5.2.4 Ergebnis Siedlungssegment	67
5.3 Modellierung von idealtypischen Siedlungen	68
6. Ökobilanzierung der Gebäude- und Siedlungsstrukturen	69
6.1 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanzierung	69
6.1.1 Lebenszyklusphasen	69

6.1.2	Funktionale Einheit	70
6.1.3	Untersuchungsrahmen und räumliche Bilanzgrenze	70
6.1.4	Zeitliche Bilanzgrenze	71
6.1.5	Sitemap Parameterverknüpfungen	71
6.2	Verfahren zur Flächen- und Mengenerhebung	74
6.2.1	Ermittlung der Gebäudeflächen, Anzahl der Wohneinheiten und Einwohner	74
6.2.2	Ermittlung von Flächen für den ruhenden Verkehr und der technischen Siedlungsinfrastruktur	76
6.3	Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz	77
6.3.1	Konstruktive Bauteile und Erdaushub (KG 300 sowie KG 510)	77
6.3.2	Gebäudetechnik (KG 400)	80
6.3.3	Außenanlagen und Freiflächen (KG 500)	81
6.4	Wärmeversorgungsanlagen (KG 420) und Energiebedarf im Betrieb	82
6.4.1	Methodik zur Bilanzierung der Wärmeversorgungsanlagen	82
6.4.2	Recherche und Auswahl der Versorgungsvarianten	83
6.4.3	Prozessmodellierung mit nPRO, Excel und eLCA	87
6.4.4	Datenkritik	87
6.5	Haushaltsstrom	88
7.	Ergebnisse der Quartiersökobilanz	91
7.1	Auswertungen des GWP auf Siedlungsebene nach Parameter und Kostengruppen	92
7.1.1	Gesamtauswertung von 972 und 162 Siedlungsvarianten	92
7.1.2	Auswertung von 54 Siedlungsvarianten	103
7.1.3	Der Einfluss des Haushaltsstroms	114
7.1.4	Konstruktionsweisen (KG 300)	117
7.1.5	Gebäudetechnik, Wärmeversorgungssysteme und Energiekennwerte (KG 400, KG 420 und B6)	123
7.1.6	Siedlungsinfrastruktur (KG 500)	126
7.1.7	Datenblatt mit Sankey-Diagramm für eine typische Siedlungsvariante	128
7.2	Auswertung der städtebaulichen Einflussfaktoren auf das GWP	130
7.2.1	Städtebauliche Einflussfaktoren und ihre Abhängigkeiten	130
7.2.2	Einfluss des Bebauungstyps, der baulichen Dichte und der Belegungsdichte	133
7.2.3	Einfluss öffentlicher Erschließungsflächen und ruhender Verkehr	136
7.3	Dynamisierung der LCA – Methodik und Relevanz	138
8.	Exemplarische Bilanzierung einer realen Siedlung	142
9.	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	147
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	147
9.2	Handlungsempfehlungen für eine klimafreundliche Siedlungsplanung	154
9.3	Limitationen der Forschungsmethodik und Datenqualität	156
9.4	Weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarfe	158
10.	Mitwirkende	162
10.1	Kurzbiographien	164
10.2	Interviews	166
10.3	Dissemination	166
	Glossar	168
	Literaturverzeichnis	173
	Anhang	187

Kurzfassung

Lebenszyklusbewertungen (LCA) für Bauteile und Gebäude sind eine etablierte Methode. Auf der Quartiers-ebene fehlt es aber an Modellen, mit denen der Energiebedarf und die damit verbundenen ökologischen Auswirkungen sämtlicher Bau- und Infrastrukturen von verschiedenen Siedlungsstrukturtypen ganzheitlich für die Nutzungsphase (Wärme, Strom, Mobilität) und für die Prozessketten sämtlicher Bau- und Infrastrukturen bewertet werden. Die vorliegende Studie hatte zwei zentrale Erkenntnisziele: Erstens sollte ermittelt werden, welchen Umfang die Treibhausgasemission haben, die durch die Siedlungsinfrastrukturen (Straßen, Kanalisation u.a.) über deren gesamten Lebenszyklus verursacht werden und welchen Anteil diese an den gesamten Treibhausgasemissionen der Siedlung haben. Zweitens sollte festgestellt werden, welche Einflussfaktoren sich besonders stark auf die Treibhausgasemissionen einer Siedlung auswirken, mit besonderem Augenmerk auf die Wirkung von städtebaulichen Einflussfaktoren.

Ausgehend von einer bundesweiten Erhebung und Auswertung von 104 Neubausiedlungen mit Baubeginn zwischen 2010 und 2020 wurde in dem Forschungsprojekt ein Bilanzierungsmodell entwickelt, das die städtebaulichen, infrastrukturellen und konstruktiven Einflussparameter integral erfasst und deren Umweltwirkungen ermittelt. Mit diesem Werkzeug zur Ermittlung einer Quartiers-Ökobilanz (Q-LCA) können unterschiedliche, aktuell in der Planungspraxis in Deutschland realisierte Siedlungsstrukturen bilanziert und miteinander verglichen werden. Das Bilanzierungsmodell umfasst im Wesentlichen sechs Hauptparameter. Auf der städtebaulichen Ebene sind das die Faktoren Gebäudetyp/Bebauungstyp, bauliche Dichte und verkehrliche Erschließung, auf der hochbaulichen Ebene die Faktoren Konstruktionsweise, Energiekennwert für den Heizwärmebedarf und Wärmeversorgungssysteme. Darüber hinaus wurde untersucht, wie groß der Anteil des Haushaltsstroms an den Treibhausgasemissionen ist und welchen Einfluss die Pro-Kopf-Wohnfläche und der ruhende Verkehr haben. Alle genannten Faktoren wurden - je nach Art - qualitativ und quantitativ abgestuft.

Um zu ermitteln, welchen Einfluss diese Parameter qualitativ und quantitativ auf die Treibhausgasemissionen verschiedener städtebaulicher Strukturen haben, wurden – basierend auf der oben erwähnten Erhebung von realen Siedlungen – 54 Siedlungssegmente mit einer Fläche von 1 ha entwickelt. Sie dienten als räumliche Bezugsgröße zur Ermittlung von Nutzflächen, der Konstruktionsmaterialien und der Siedlungsinfrastrukturen. Außerdem waren die Segmente derart aufgebaut, dass sie zu größeren Siedlungsstrukturen kombiniert werden konnten. Dies wurde dazu genutzt, um eine Auswahl idealtypischer Siedlungen mit einer Fläche von 6 ha zu bilden. Diese idealtypischen Siedlungen repräsentieren Siedlungsstrukturen, die im deutschen Siedlungsbau häufig zur Anwendung kommen.

Aus der Kombination aller Faktoren und ihrer Abstufungen ergeben sich insgesamt 972 verschiedene Bilanzierungsvarianten, für die mit einem Rechenmodell die jeweiligen Treibhausgasemissionen ermittelt wurden. Aus diesen Berechnungen wurden dann ein flächenbezogener und ein personenbezogener Kennwert abgeleitet. Durch diese Vorgehensweise war es einerseits möglich, die Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Siedlungsstrukturen systematisch zu ermitteln und zu vergleichen. Andererseits konnte festgestellt werden, welchen Einfluss die einzelnen Faktoren auf die Treibhausgasemissionen dieser Siedlungsstrukturen haben. Um die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern unter gleichen Annahmen sichtbar zu machen wurden unter anderem Daten-Dashboards entwickelt. Ferner konnte mit Hilfe der Siedlungssegmente eine real existierende Siedlung nachgebildet und bilanziert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die bauliche Dichte, der Gebäudetyp und die Energieversorgungssysteme den größten Einfluss auf das GWP haben. Mit zunehmender Dichte sinken die spezifischen Emissionen pro Fläche und Person signifikant. Reihenhaushaus und mehrgeschossige Blockrandstrukturen erreichen bis zu 30 % geringere Emissionen als weniger dicht bebaute Einfamilienhaussiedlungen. Die Form der Erschließung (Gitter-, Schlaufen- oder Sackgassensysteme) wirkt sich dagegen nur marginal auf die Gesamtbilanz aus. Der Anteil der Infrastruktur an den Gesamtemissionen liegt je nach Dichte zwischen 10 und 15 %. Tiefgaragen erhöhen das GWP deutlich und sollten, soweit möglich, vermieden werden. Die energetische Qualität der Ge-

bäude sowie die Wahl des Energieversorgungssystems stellen jedoch die größten Hebel dar. Zwischen einem Niedrigstenergiegebäude (Heizwärmebedarf 15 kWh/m² a) und einem konventionellen Neubau (Heizwärmebedarf 70 kWh/m² a) bestehen Emissionsunterschiede von bis zu 40 %. Strombasierte Wärmepumpensysteme reduzieren die Emissionen gegenüber fossilen Gasheizungen um 30 bis 40 %, wobei sich dieser Effekt unter den Bedingungen einer fortschreitenden Dekarbonisierung des Strommixes weiter verstärken wird.

Über alle Varianten hinweg zeigt sich ein deutlicher ökologischer Vorteil der Holzbauweise. Im Mittel liegt das GWP von Holzkonstruktionen um 1,5 bis 2 kg CO₂-Äquivalente pro Quadratmeter Nettoraumfläche und Jahr unter dem von mineralischen Bauweisen, was einem relativen Vorteil von etwa sechs Prozent entspricht. Darüber hinaus spielen Belegungs- und Wohnflächendichte eine zentrale Rolle: Bei einer Reduktion der durchschnittlichen Wohnfläche um 5 m², lässt sich das Pro-Kopf-GWP in einem Quartier im Jahr um rund 11 % mindern. Suffizienzstrategien, etwa kleinere Wohnungseinheiten oder gemeinschaftliche Wohnformen, erweisen sich damit als wirksame Ergänzung zu technischen Effizienzmaßnahmen.

Die durchschnittliche Verteilung der Emissionen zeigt, dass etwa 50 % des Gesamt-GWP auf die Gebäudeherstellung (Kostengruppen 300–400), 30 bis 35 % auf den Gebäudebetrieb (Wärmeenergie, B6), 10 bis 15 % auf die Infrastruktur (KG 500) und etwa 5 % auf die Wärmeversorgungssysteme (KG 420) entfallen. Die Berücksichtigung des Haushaltsstroms in der Bilanz erhöht das Gesamt-GWP signifikant und kann bei einer statischen LCA-Betrachtung unter der Annahme des deutschen Strommixes mit 430 g CO₂-Äquivalente pro kWh (Bilanzjahr 2022) mehr als 50 % am Gesamt-GWP einer Siedlung betragen. Mit steigendem Energiestandard sinkt der Anteil der Betriebsenergie deutlich, während der Anteil der Bau- und Infrastrukturemissionen zunimmt. Die bauliche Dichte beeinflusst insbesondere den flächenbezogenen GWP und führt zu einer effizienteren Nutzung der baulichen und technischen Strukturen. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Annahme einer linearen Reduktion der Umweltauswirkungen mit zunehmender Dichte nur eingeschränkt gilt, da ab bestimmten Geschosshöhen gegenläufige Effekte auftreten, die u.a. auf höhere Konstruktionsanteile, größeren Erschließungsflächen und Abstandsflächen zurückzuführen sind.

Aus den Ergebnissen lassen sich zentrale Handlungsempfehlungen ableiten: Eine Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche und eine höhere Belegungsdichte stellen wesentliche Hebel zur Senkung von Treibhausgasemissionen dar. Ergänzend sollten Verdichtungspotenziale in bestehenden Siedlungsstrukturen genutzt und der Bau ressourcenintensiver Tiefgaragen vermieden werden. Eine vollständige Dekarbonisierung der Energieversorgung, der Einsatz nachhaltiger und recyclingfähiger Baustoffe sowie die Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebäuden und Infrastrukturen sind weitere Schlüsselmaßnahmen zur Reduktion des GWP von Siedlungen.

Das Q-LCA-Modell liefert ein methodisch fundiertes, praxisorientiertes Instrument zur quantitativen Bewertung ökologischer Effekte im Quartiersmaßstab. Es bietet Kommunen, Planungsbüros und politischen Entscheidungsträgern eine Grundlage, um städtebauliche und bautechnische Entscheidungen im Hinblick auf Klimaschutz und Ressourceneffizienz zu steuern und so zur Entwicklung nachhaltiger, CO₂-armer Siedlungsstrukturen beizutragen. Künftige Forschungsvorhaben sollten auf die Integration dynamischer Lebenszyklusanalysen, die Einbeziehung der baulichen Transformation von Bestandsquartieren und die Berücksichtigung mobilitätsbedingter Emissionen ausgedehnt werden.

Abstract

Life cycle assessments (LCA) for building components and buildings are an established method. At the neighbourhood level, however, there is a lack of models that can be used to holistically assess the energy requirements and associated ecological impacts of all buildings and infrastructure of different settlement structure types for the utilisation phase (heat, electricity, mobility) and for the process chains of all buildings and infrastructure. This study had two main objectives: Firstly, to determine the extent of greenhouse gas emissions caused by settlement infrastructures (roads, sewerage systems, etc.) over their entire life cycle and their share of the settlement's total greenhouse gas emissions. Secondly, it sought to identify the factors that have a particularly strong impact on the greenhouse gas emissions of a settlement, with a special focus on the effect of urban planning factors.

Based on a nationwide survey and evaluation of 104 new housing developments with construction starting between 2010 and 2020, the research project developed an accounting model that comprehensively records the urban planning, infrastructural and construction-related influencing parameters and determines their environmental impact. This tool for determining a neighbourhood life cycle assessment (Q-LCA) can be used to assess and compare different settlement structures currently being implemented in planning practice in Germany. The accounting model essentially comprises six main parameters. At the urban planning level, these are the factors of building type/development type, building density and transport links; at the structural engineering level, the factors are construction method, energy value for heating requirements and heat supply systems. In addition, the study examined the share of household electricity in greenhouse gas emissions and the influence of per capita living space and stationary traffic. All of the factors mentioned were graded qualitatively and quantitatively, depending on their type.

In order to determine the qualitative and quantitative influence of these parameters on the greenhouse gas emissions of various urban structures, 54 settlement segments with an area of 1 hectare were developed based on the above-mentioned survey of real settlements. They served as a spatial reference for determining usable areas, construction materials and settlement infrastructures. In addition, the segments were structured in such a way that they could be combined to form larger settlement structures. This was used to create a selection of ideal-typical settlements with an area of 6 hectares. These ideal-typical settlements represent settlement structures that are frequently used in German settlement construction. The combination of all factors and their gradations resulted in a total of 972 different balance variants, for which the respective greenhouse gas emissions were determined using a calculation model. An area-related and a person-related characteristic value was then derived from these calculations. This approach made it possible to systematically determine and compare the greenhouse gas emissions of different settlement structures. On the other hand, it was possible to determine the influence of the individual factors on the greenhouse gas emissions of these settlement structures. Data dashboards were developed, among other things, to visualise the interactions between the individual parameters under the same assumptions. Furthermore, with the help of the settlement segments, it was possible to simulate and balance a real existing settlement.

The results show that building density, building type and energy supply systems have the greatest influence on GWP. As density increases, specific emissions per area and person decrease significantly. Terraced houses and multi-storey perimeter block structures achieve up to 30% lower emissions than less densely built-up single-family housing estates. The type of development (grid, loop or cul-de-sac systems), on the other hand, has only a marginal effect on the overall balance. Depending on density, infrastructure accounts for between 10 and 15% of total emissions. Underground car parks significantly increase the GWP and should be avoided where possible. However, the energy quality of buildings and the choice of energy supply system are the most important levers. There are emission differences of up to 40% between a nearly zero-energy building (heating requirement 15 kWh/m² a) and a conventional new building (heating requirement 70 kWh/m² a). Electricity-based heat pump systems reduce emissions by 30 to 40% compared to fossil gas heating systems, and this effect will be further amplified as the electricity mix becomes increasingly decarbonised.

Across all variants, timber construction offers a clear ecological advantage. On average, the GWP of timber constructions is 1.5 to 2 kg CO₂ equivalents per square metre of net floor space per year lower than that of mineral construction methods, which corresponds to a relative advantage of around six per cent. In addition, occupancy and living space density play a key role: reducing the average living space by 5 m² can reduce the per capita GWP in a neighbourhood by around 11% per year. Sufficiency strategies, such as smaller residential units or communal living arrangements, thus prove to be an effective complement to technical efficiency measures.

The average distribution of emissions shows that around 50% of the total GWP is attributable to building construction (cost groups 300–400), 30 to 35% to building operation (heat energy, B6), 10 to 15% to infrastructure (cost group 500) and around 5% to heat supply systems (cost group 420). Taking household electricity into account in the balance sheet significantly increases the total GWP and, in a static LCA analysis based on the German electricity mix of 430 g CO₂ equivalents per kWh (balance sheet year 2022), can account for more than 50% of the total GWP of a housing estate. As energy standards rise, the share of operating energy decreases significantly, while the share of construction and infrastructure emissions increases. Building density particularly influences the area-related GWP and leads to more efficient use of building and technical structures. At the same time, it is evident that the assumption of a linear reduction in environmental impact with increasing density is only valid to a limited extent, as counteracting effects occur above a certain number of storeys, which are attributable, among other things, to higher construction proportions, larger development areas and clearance areas.

Key recommendations for action can be derived from the results: a reduction in per capita living space and higher occupancy density are key levers for reducing greenhouse gas emissions. In addition, densification potential in existing settlement structures should be exploited and the construction of resource-intensive underground car parks should be avoided. Complete decarbonisation of the energy supply, the use of sustainable and recyclable building materials, and the extension of the service life of buildings and infrastructure are further key measures for reducing the GWP of settlements.

The Q-LCA model provides a methodologically sound, practice-oriented tool for the quantitative assessment of ecological effects at the neighbourhood level. It offers local authorities, planning offices and political decision-makers a basis for steering urban planning and construction decisions with regard to climate protection and resource efficiency, thereby contributing to the development of sustainable, low-carbon settlement structures. Future research projects should be expanded to include dynamic life cycle analyses, the structural transformation of existing neighbourhoods and mobility-related emissions.

1. Untersuchungsgegenstand und Projektziele

1.1 Themenfeld und Untersuchungsgegenstand

Der Siedlungsbau in Deutschland befindet sich im Spannungsfeld zwischen wachsender Wohnraumnachfrage und ambitionierten Klimaschutzzielen. Das Wohnraumdefizit hat sich bis Ende 2022 auf rund 700.000 Wohnungen akkumuliert (Pestel-Institut, 2024) und wird sich aufgrund rückläufiger Bautätigkeiten voraussichtlich weiter vergrößern. Gleichzeitig führen der anhaltende Bevölkerungszuwachs vor allem in urbanen Regionen sowie die stetig steigende Pro-Kopf-Wohnfläche – unter anderem infolge des sogenannten Remanenzeffekts – zu einer weiteren Ausdehnung der Siedlungsflächen. Mit dem Leitbild der Innenentwicklung durch Nachverdichtung lässt sich diese Nachfrage nur teilweise kompensieren. Rechtliche oder planerische Eingriffsmöglichkeiten zur Steuerung individueller Wohnortentscheidungen, des Wohnflächenverbrauchs oder der Haushaltsgröße sind derzeit kaum umsetzbar. Bei einer Erholung der Baukonjunktur ist von erheblichen Nachholeffekten auszugehen, die vor allem in Form neuer Siedlungen und großmaßstäblicher Quartiersentwicklungen auftreten werden. Diese Entwicklung verschärft bestehende Zielkonflikte zwischen sozialpolitischen Erfordernissen des Wohnungsbaus und ökologischen Verpflichtungen aus Klimaschutz und Ressourcenschonung.

Vor diesem Hintergrund kommt der ökologisch nachhaltigen Entwicklung von Siedlungsstrukturen eine zentrale Bedeutung zu. Neben der Betrachtung der Flächeninanspruchnahme und der Materialströme für Hoch- und Tiefbau sind insbesondere städtebauliche Parameter wie Dichte, Strukturtyp und Standortwahl von entscheidendem Einfluss auf den Energieverbrauch und damit auf die Klimabilanz einer Siedlung. Diese wirken sowohl auf den Betriebsenergiebedarf der Gebäude als auch auf den durch Mobilität induzierten Energieverbrauch.

Die ökologischen Auswirkungen von Siedlungen sind vielfältig und umfassen insbesondere:

- Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential, GWP *) aus der Errichtung einschließlich vorgelagerter Lieferketten (graue Emissionen),
- Emissionen aus der Nutzungsphase, vor allem durch Heizenergie und Haushaltsstrom,
- den Verbrauch nicht regenerativer Rohstoffe,
- die Versiegelung von Flächen mit Folgen für Biodiversität, Wasserhaushalt und Mikroklima,
- das Aufkommen von Aushub und Bauabfällen mit bisher unzureichender stofflicher Wiederverwertung sowie
- verkehrsbedingte Emissionen, die durch die stadträumliche Lage einer Siedlung maßgeblich beeinflusst werden.

Für die Ermittlung und Bewertung der ökologischen Auswirkungen können verschiedene Methoden zur Umweltbewertung angewendet werden (Frischknecht 2005, Andes 2019). Zur quantitativen Erfassung dieser Umweltwirkungen werden vor allem die Methode der Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) herangezogen. Während für Gebäude und Bauteile standardisierte LCA-Verfahren etabliert sind, besteht auf der Ebene ganzer Siedlungen oder Quartiere bislang ein Mangel an systematischen Untersuchungen und belastbaren Vergleichsdaten. Damit fehlt eine valide Grundlage für strategische Entscheidungen über Siedlungsentwicklung, Energieversorgung und Flächennutzung im Sinne einer integrierten und nachhaltigen Stadtplanung.

* Im Folgenden wird im Bericht die englische Kurzform GWP (= global warming potential in CO₂-Äquivalenten) synonym für den deutschsprachigen Begriff Treibhausgasemissionen verwendet.

1.2 Entwicklungsbedarfe

Während Lebenszyklusanalysen für Gebäude und deren Komponenten fest etabliert sind, mangelt es an systematischen Untersuchungen auf der Ebene von Siedlungen und Quartieren. Die Gesamtumweltwirkung einer Siedlung kann nicht durch die bloße Aggregation einzelner Gebäudebilanzierungen erfasst werden. Erst eine Quartiers-Ökobilanz (Q-LCA), die auch die Infrastruktur und standortbedingte Energieverbräuche berücksichtigt, ermöglicht ein vollständiges und raumbezogenes Abbild des Umweltfußabdrucks. Die Übertragung gebäudebezogener Bilanzierungsansätze auf komplexe Siedlungsstrukturen ist aber methodisch anspruchsvoll, da hier zusätzliche Komponenten – wie Verkehrsflächen, Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen oder Energieversorgungsnetze – in die Betrachtung einfließen müssen.

Da städtebauliche Strukturen deutlich längere Lebenszyklen als einzelne Gebäude aufweisen und nachträgliche strukturelle Veränderungen unter anderem aufgrund meist komplexer Eigentumsverhältnisse nur schwer umsetzbar und äußerst zeit- und kostenintensiv sind, kommen Entscheidungen bei der Planung und Umsetzung von Siedlungsstrukturen für das Erreichen der gesellschaftlichen Umwelt- und Klimaziele eine entscheidende Rolle zu. Eine fundierte Bewertung dieser Strukturentscheidungen in der frühen Planungsphase ist bislang kaum möglich. Für die Planungspraxis und politischen Entscheidungsträger und -trägerinnen braucht es daher geeignete Methoden und Instrumente, um die durch den Siedlungsbau verursachten Emissionen und Ressourceneinsätze umfassend zu bilanzieren. Es fehlt insbesondere an geeigneten Bewertungswerkzeugen, die eine ganzheitliche, vergleichbare Analyse der ökologischen Auswirkungen von Siedlungsstrukturen ermöglichen und von kommunalen Entscheidungsträgern genutzt werden können.

Das Erreichen politischer Klimaschutzvereinbarungen und der damit verbundenen CO₂-Minderungsziele, die beispielsweise zwischen Ländern und städtischen Versorgungsunternehmen wie in Berlin zwischen dem Berliner Senat und den Wasserbetrieben abgeschlossen werden, zeigen die Notwendigkeit der Messbarmachung von GWP in Tiefbaumaßnahmen (Fuchs 2023).

Planerinnen und Planer greifen häufig auf Erfahrungswissen zurück, etwa die Annahme, dass kompakte Bauweisen generell nachhaltiger seien. Bislang fehlen belastbare empirische Daten und standardisierte Vergleichswerte, die Gebäude nicht isoliert, sondern im Zusammenhang sämtlicher Siedlungskomponenten erfassen. Bisherige Studien berücksichtigen wesentliche Einflussgrößen meist nur teilweise und sektoral, etwa verkehrsbedingte Emissionen, Grünanlagen oder Bauabfälle. Auch die ökologische Bewertung von Bestandsquartieren ist methodisch bislang nicht hinreichend gelöst und bedarf weiterer Forschung.

1.3 Projektziele

Um das übergeordnete Ziel einer umweltverträglichen Siedlungsentwicklung zu erreichen, sollte in diesem Forschungsprojekt eine wissenschaftlich fundierte Bewertungs- und Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, die eine Reduktion der Treibhausgasemissionen im Siedlungsbau unterstützt.

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht die Erfassung und Bewertung der Umweltauswirkungen verschiedener Siedlungstypen. Dabei werden Stoffströme, Energieverbräuche einschließlich der grauen Energie sowie die resultierenden Treibhausgasemissionen systematisch bilanziert. Die Untersuchung basierte auf exemplarischen Siedlungstypen, die repräsentativ für in Deutschland übliche Neubauquartiere stehen. Durch die vergleichende Bewertung dieser Typologien sollten die maßgeblichen Einflussfaktoren für das GWP identifiziert und der Beitrag einzelner Strukturparameter - insbesondere auch der infrastrukturellen Komponenten - transparent gemacht werden.

Als erstes Ziel galt es daher, ein validiertes Bilanzierungsmodell zu entwickeln, das eine ganzheitliche Lebenszyklusanalyse (LCA) auf Siedlungsebene ermöglicht. Dieses Modell – konzipiert als „morphologischer

Baukasten“ – erlaubt die flexible Kombination und Bewertung unterschiedlicher Gebäudetypen, Dichten, Erschließungsarten und Energieversorgungssysteme, um neu zu errichtende Siedlungsstrukturen möglichst umweltschonend und ressourceneffizient zu gestalten.

Das Modell sollte modular und parametrisch konzipiert werden, um spätere Erweiterungen und Anpassungen an verschiedene Maßstabebenen und weitere Anwendungsbereiche sowie die Bilanzierung realer als auch hypothetischer Siedlungsvarianten zu ermöglichen. Es sollte eine flexible Anpassung der Systemgrenzen und damit eine funktional und räumlich skalierbare Anwendung erlauben. So kann das Modell zukünftig auch um weitere Bilanzobjekte, wie beispielsweise Verkehrsinfrastruktur, Freiraumelemente oder wasserwirtschaftliche Systeme, ergänzt werden. Ein besonderes Augenmerk lag somit auf der Offenheit und Anschlussfähigkeit des Modells und dieses basiert auf einem open-source orientierten Ansatz, um Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Weiterentwicklung durch die Fachgemeinschaft zu gewährleisten.

Darüber war ein Anspruch, das Bilanzierungsmodell im Hinblick auf eine hohe "Robustheit" und Nutzerfreundlichkeit hin zu entwickeln. Eine klare Datenstruktur und möglichst intuitive Bedienbarkeit sollen gewährleisten, dass auch Anwenderinnen und Anwender außerhalb der Forschung – etwa in kommunalen Planungsämtern oder Ingenieurbüros – das Modell effizient einsetzen können. Schnittstellen zur Implementierung relevanter Datenbanken, die Material- und Energiedaten, Emissionsfaktoren sowie typische Bau- und Infrastrukturkennwerte enthalten, sollen eine konsistente und reproduzierbare Anwendung unterstützen.

Das Projekt verfolgte neben der methodischen auch eine anwendungsorientierte Zielsetzung. Die Ergebnisse sollten in Form von Handlungsempfehlungen aufbereitet werden, um kommunale Planungs- und Entscheidungsprozesse zu unterstützen. Daher wurde als ein weiteres, zentrales Projektergebnis die begleitende Publikation "Q-LCA. Städtebauliche Merkmale einer klimaorientierten Quartiersplanung" verfasst. Diese dokumentiert die Strukturmerkmale und Umweltkennwerte typischer Siedlungstypen und soll als Referenzwerk für die Planungspraxis dienen.

Das Forschungsprojekt reagiert somit auf den dringenden Handlungsbedarf, der sich aus der Diskrepanz zwischen wachsendem Wohnraumbedarf und klimapolitischen Verpflichtungen ergibt. Es adressiert methodische, empirische und planerische Lücken in der bisherigen Forschung und Praxis der Siedlungsentwicklung. Durch die Entwicklung eines validierten Bilanzierungsmodells, die Ermittlung typologischer Kennwerte und die Erstellung einer praxisorientierten Zusammenfassung soll eine Grundlage geschaffen werden, die Umweltauswirkungen von Siedlungsstrukturen messbar und vergleichbar zu machen.

2. Problemstellung - Stand der Forschung

Gebäude und Infrastrukturen in urbanen Systemen benötigen zur Herstellung und zum Betrieb viel Energie und sind durch eine hohe Stoffintensität sowie eine große Inanspruchnahme versiegelter Flächen gekennzeichnet. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen spielt ein nachhaltiges Ressourcenmanagement urbaner Systeme eine große Rolle und so gibt es zahlreiche Forschungsprojekte, die sich mit der Analyse und Optimierung dieser Ressourcen beschäftigen. An dieser Stelle kann daher nur eine exemplarische Übersicht zu relevanten Studien gegeben werden. Diese unterscheiden sich neben dem konkreten Untersuchungsgegenstand vor allem in ihrer Methodik, ob sie beispielsweise mit Lebenszyklusanalysen (LCA) oder mit Material- bzw. Stoffflussanalysen (MFA/SFA) durchgeführt wurden.

Bei einer Lebenszyklusanalyse stützt sich die Umweltbewertung auf normierte Datensätze aus Umweltdatenbanken (z.B. ÖKOBAUDAT, ecoinvent oder GABI) und EPDs, die mit projektspezifischen Mengenangaben kombiniert werden. Eine Stoffflussanalyse hingegen nutzt empirische, mengenbasierte Datenquellen aus Statistiken sowie zu Stoffkennwerten und Prozessdaten für eine systematische Erfassung und Nachverfolgung der Stoffströme innerhalb des untersuchten Systems. Die Umweltwirkungen werden dann über eine nachgelagerte Bewertung der Stoffströme durch deren Verknüpfung mit Ökobilanzdaten ermittelt.

In Deutschland entfallen etwa 40 % der CO₂-Emissionen auf die Herstellung und den Betrieb von Hochbauten, davon wiederum rund 75 % auf den Betrieb und 25 % auf die Gebäudeherstellung und vorgelagerten Prozessketten der Materialbereitstellung (BBSR 2020:1, Referenzjahr 2014). Während der Gebäudebetrieb weiterhin eine dominante Rolle bei den CO₂-Emissionen spielt, wird zunehmend die graue Energie - das ist die aufgrund der Herstellungsprozesse in Baumaterialien gebundene Energie - als wichtiger Umweltfaktor erkannt. Insbesondere beim energieeffizienten Neubau in der mitteleuropäischen Klimazone ist dies ein relevanter Planungsfaktor, da der Anteil der grauen Energie hier teilweise mehr als 50 % des gesamten Energieverbrauchs im Lebenszyklus betragen kann (Gengnagel/Apellániz 2023). Eine Reduktion der grauen Energie stellt einen weiteren Optimierungsfaktor dar. Da bis zu 70 % der grauen Energie eines Bauwerks auf das Tragwerk entfallen können (ebd.), lässt sich durch die Optimierung massereicher Konstruktionselemente, z.B. durch Holzbauweisen, die Ökobilanz erheblich verbessern – sofern die eingesetzten Baustoffe über einen langen Zeitraum im Bauwerk verbleiben (Hafner 2021, Hauke/Hein 2024).

Der prozentuale Anstieg der grauen Energie in energieeffizienten Gebäuden ist vor allem auf die relationale Verschiebung durch den reduzierten Betriebsenergiebedarf zurückzuführen. Eine Auswertung internationaler Berechnungen zeigt jedoch, dass die Ergebnisse zur grauen Energie häufig inkonsistent sind, da sie in den meisten Fällen auf unterschiedlichen Berechnungsverfahren und auf zahlreichen Faktoren, wie dem Alter der Daten, dem spezifischen Energiemix oder unterschiedlichen Technologien der Herstellungsprozesse beruhen (Ibn-Mohammed et al. 2013: 240). Außerdem gibt es keine allgemein verbindliche Methode, um die graue Energie genau und konsistent zu berechnen, weshalb große Schwankungen bei den Berechnungen unvermeidlich sind (Ibn-Mohammed et al. 2013: 237).

Während es für Gebäude und Bauteile zahlreiche Lebenszyklusbewertungen gibt, ist die Erschließungsinfrastruktur und deren Anteil an der Gesamtbilanz von Siedlungen bislang ein weniger gut untersuchtes Gebiet. Da diese Fragestellung im Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit stand, sind im Folgenden Methoden und Ergebnisse aus Studien dargestellt, die in methodischer Hinsicht oder als Datenquelle eine besondere Bedeutung für das Forschungsprojekt haben und dessen Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext ermöglichen. Diese Studien lassen sich folgenden sieben Themenfeldern zuordnen:

- Bestandserhebung und Typisierung von Neubausiedlungen
- Erhebung und Bewertung urbaner Stoffströme auf der Makroebene

- Lebenszyklusanalysen und Stoffströme von Gebäuden
- Lebenszyklusanalysen von Quartieren und Infrastrukturen
- Energiesystemmodelle für die Wärmeversorgung
- Methodische Ansätze zu einer sektorübergreifenden Quartiersbilanzierung
- Bilanzierungswerkzeuge für Umweltwirkungen von Siedlungen und Quartieren.

2.1 Bestandserhebung und Typisierung von Neubausiedlungen

Das in dem Forschungsprojekt entwickelte Bilanzierungsmodell hat den Anspruch, nützliche Informationen zur Entscheidungsfindung in der Planungspraxis für die Siedlungsentwicklung bereitzustellen. Aus diesem Grund wurde das Modell auf die typologischen Merkmale des deutschen Siedlungsneubaus abgestimmt. Aktuelle Forschungen zum deutschen Siedlungsgeschehen konnten nur bedingt für diesen Zweck herangezogen werden.

Unter den wenigen Projekten und Publikationen, die in den vergangenen Jahren dazu entstanden sind, beziehen sich die meisten entweder auf gewachsene und vorhandene Stadtstrukturen, die im typologischen Sinn keine Siedlungen darstellen (siehe u.a. Mueller-Hagen et al. 2014; Tubbesing et al. 2018), oder auf konkrete Siedlungstypen wie Gartenstadtsiedlungen oder Großwohnsiedlungen, die jedoch nicht dem zeitgenössischen Siedlungsgeschehen in Deutschland entsprechen. Daher wurde eine eigene Erhebung durchgeführt, die als Grundlage zur Modellbildung diene. Deren Methodik und Ergebnisse sind ausführlich in Kapitel 4 dargestellt.

Von besonderer Bedeutung ist die IWU Gebäudetypologie (IWU 2015), die als Meilenstein zur Klassifizierung des deutschen Gebäudebestands zu bezeichnen ist. Sie dient seit den frühen 2000er Jahren als Grundlage zur Einordnung und energetischen Bewertung des deutschen Wohn- und Nichtwohngebäudebestandes. In der Typologie sind Gebäude nach Typen (z. B. Einfamilienhäuser, Reihemittelhaus, kleine und große Mehrfamilienhäuser, Hochhäuser) und Baualtersklassen klassifiziert, für die standardisierte, typen- und altersgemäße Merkmale für Gebäudenutzfläche, Gebäudehüllfläche, U-Werte und Energiekennwerte ermittelt wurden. Damit wurde eine bundesweit einheitliche Systematik geschaffen, die eine hinreichend genaue Abschätzung des Energiebedarfs des deutschen Gebäudebestands ermöglicht und vor allem als Planungs- und Entscheidungsgrundlage für die politische Steuerung von Sanierungsstrategien dient. Ergänzend zur bundesweiten Datenbank gab es internationale Studien zur Erhebung von Gebäuden für die energetische Bewertung des Wohngebäudebestands in 13 europäischen Ländern (TABULA, <https://episcopo.eu/welcome/>) sowie Überblicksstudien zu regionaltypischen Konstruktionsweisen mit bauphysikalischen Kennwerten, die als Planungshilfe für Umbaumaßnahmen und energetische Sanierungen dienen (Klauß/Kirchhof 2010, Lohse et al. 2025).

2.2 Erhebung und Bewertung urbaner Stoffströme auf der Makroebene

Das urbane Materiallager ist in entwickelten Städten sehr hoch und wird unter dem Konzept des Urban Mining schon seit längerem als zukünftige Sekundärrohstoffquelle diskutiert. Methodisch werden hierfür vor allem Stoffstromanalysen durchgeführt (u.a. Lichtensteiger 1998 und 2006, Baccini 2008). Neben der Erfassung und Bewertung der urbanen Materiallager sind insbesondere die Flächeninanspruchnahme und Baustoffintensität von Siedlungstypen sowie die Bewertung der Infrastrukturfolgekosten relevante, miteinander zusammenhängende Forschungsfelder.

Exemplarisch für eine Reihe wissenschaftlicher Arbeiten, die sich mit den ökologischen, infrastrukturellen und raumplanerischen Herausforderungen des nachhaltigen Bauens und Wohnens befassen, ist die Studie "Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland" (Buchert et al. 2004) zu nennen. Die Studie wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt und verfolgte das Ziel, ökologische Handlungsspielräume im Bedürfnisfeld Bauen und Wohnen systematisch zu identifizieren und zu bewerten, da dieser Sektor eine zentrale Rolle hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs, der Flächeninanspruchnahme sowie des Energie- und Stoffstrommanagements spielt und stark von demografischen, ökonomischen und räumlichen Wandlungsprozessen beeinflusst wird. Als methodische Grundlage diente das Stoffstrommodell BASiS-2 (Bedarfsorientiertes Analysewerkzeug für Stoffströme in Szenarien), mit dem der Wohnungsbestand und die zugehörige technische Infrastruktur in Deutschland zeitlich und räumlich differenziert abgebildet wurde.

Die Berechnungen wurden mit einer sogenannten bedürfnisfeldorientierten Stoffstromanalyse durchgeführt, die bereits in früheren Projekten entwickelt und im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens systematisch erweitert wurde. Hierbei wurden sowohl Neubau- als auch Erhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen berücksichtigt und nach verschiedenen Raumtypen (Kernstädte, suburbane Räume, ländlicher Raum) sowie sogenannten Bebauungsleittypen differenziert (Buchert et al. 2004:4). Durch die Unterscheidung von Innenentwicklung (z.B. Nachverdichtung, Umnutzung von Brachflächen) und Außenentwicklung (Bauen auf der „grünen Wiese“) konnten sowohl aus ex-post-Analysen des Status quo als auch aus ex-ante-Modellierungen zukünftiger Entwicklungspfade (Szenarioanalysen) differenzierte Aussagen zur Infrastrukturbeanspruchung abgeleitet werden. In den Szenarien wurde nach Bauaktivität, Sanierungsraten, regionalen Entwicklungsschwerpunkten sowie der Flächennutzungspolitik unterschieden.

Die Ergebnisse der Stoffstromanalysen zeigten, dass die Außenentwicklung mit einem überproportional hohen Bedarf an Baumaterialien und Infrastrukturinvestitionen einhergeht, die vor allem durch technische Erschließungsmaßnahmen bedingt sind. Im Hinblick auf die Gebäudebestände hat die Instandhaltung und Modernisierung bestehender Wohngebäude eine hohe Relevanz, um wesentliche Reduktionen bei Treibhausgasemissionen, Rohstoffbedarf und Flächennutzung zu erzielen. Die detaillierten Analysen der Ressourceninanspruchnahme durch Verkehrsflächen und Leitungssysteme zeigten, dass Infrastrukturmaßnahmen in bestimmten Siedlungsformen bis zu einem Drittel der gesamtbilanzierenden Rohstoffflüsse verursachen können. Als Konsequenz wurde ein Paradigmenwechsel in der Stadtentwicklung gefordert, der strategisch auf einen qualitätsvollen Umgang mit dem Bestand, Innenentwicklung, energetische Sanierung und den Rückbau nicht mehr benötigter Infrastruktur ausgerichtet ist.

Neben der ökologischen Bewertung von Energie- und Stoffströmen haben um die Jahrtausendwende herum im Kontext der Folgen des Bevölkerungsrückgangs in vielen ostdeutschen Regionen ökonomische Fragen der Infrastrukturplanung - und hier insbesondere die Ermittlung von Infrastrukturfolgekosten beim Rückbau von Siedlungen und Infrastrukturen - einen starken Bedeutungszuwachs erfahren. Wichtige Studien hierzu kamen insbesondere vom IOER Dresden (Gruhler et al. 2002; Deilmann 2004; Schiller/Siedentop 2005; Siedentop et al. 2006), die aus regionalspezifischen Analysen verallgemeinerbare Erkenntnisse lieferten. Zentrale Ergebnisse sind in der Studie "Siedlungsentwicklung und Infrastrukturaufwendungen" (Schiller 2004) zusammengefasst, die den Zusammenhang zwischen baulicher Dichte und dem Ressourcenaufwand für die interne Siedlungserschließung darstellt. Unterhalb einer Geschossflächenzahl (in der Studie als "Geschossflächendichte" bezeichnet) von 0,6 nimmt der Baumassenanteil des Tiefbaus exponentiell zu (Abbildungen 1 und 2) (Schiller 2004:5-6).

Abbildung 1: Spezifisches erschließungsbedingtes Stofflager und Geschossflächendichte. Quelle: Schiller, 2004: Siedlungsentwicklung und Infrastrukturaufwendungen, S.5

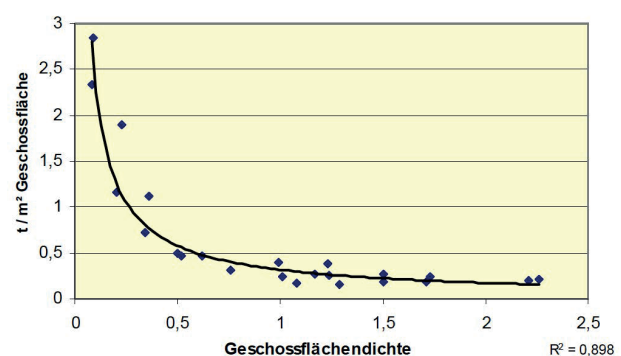
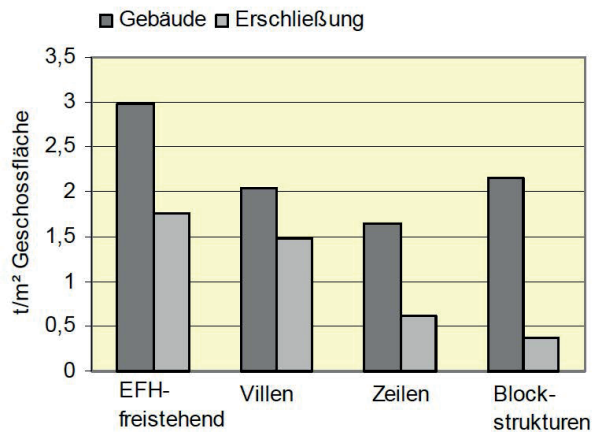


Abbildung 2:

Spezifisches Stofflager von Wohngebäuden und Erschließungsanlagen. Quelle: Schiller, 2004: Siedlungsentwicklung und Infrastrukturaufwendungen, S.6



Die Arbeit basiert auf empirischen Erhebungen in sächsischen Städten, die zeigen, dass der Anteil des infrastrukturellen Stofflagers an der Gesamtmasse in Gebieten niedriger Dichte bis zu 75 % betragen kann, im Gegensatz zu etwa 20% in verdichteten Bereichen. Modellrechnungen zur Stadt Bautzen verdeutlichen, dass bei einer jährlichen Neubautätigkeit von nur 0,5 % bereits nach 15 Jahren mehr Ressourcen für die Infrastruktur als für den Hochbau benötigt werden. Die Schlussfolgerung lautet, dass kompaktere Stadtstrukturen erhebliche Ressourceneinsparungen bewirken, dass eine strategische Siedlungsentwicklung aber auch die technischen Netze hinsichtlich Siedlungsdichte und Ausdehnung optimieren muss. Gerade schrumpfende Regionen stehen vor der Herausforderung, bestehende Infrastrukturen mit rückläufiger Nutzungsintensität zu betreiben, was langfristig ineffizient und ressourcenintensiv ist.

Aus den Studien wird ersichtlich, dass Einfamilienhaussiedlungen hinsichtlich der in den Gebäuden und technischen Infrastrukturen gebundenen Baustoffe, der Energiebedarfe, der Flächeninanspruchnahme und der Infrastruktur(folge)kosten die ressourcenaufwendigste Siedlungsform bilden (Abbildung 3). Dennoch ist diese Gebäude- und Wohnform im gesamten Bundesgebiet am stärksten nachgefragt - und wird es allen Prognosen nach auch bleiben (BBSR 2022, 2025).

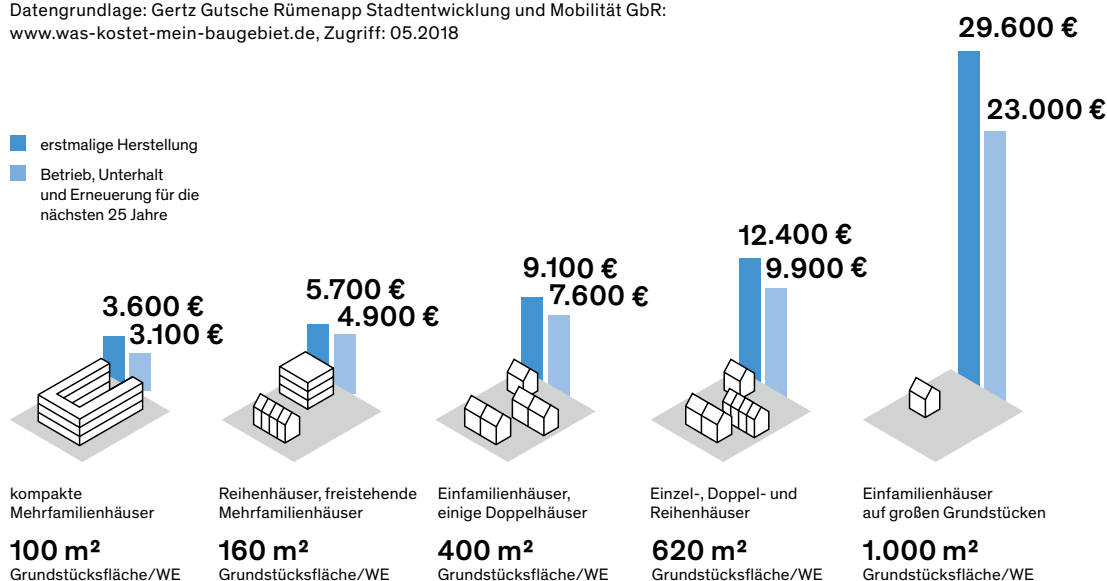
Abbildung 3:

Erschließungs- und Folgekosten für Straße, Kanal, Trinkwasser und Strom pro Wohneinheit (WE) bei mittlerem Kostenniveau von 2017. Quelle: Bundesstiftung Baukultur, 2018, S.24.

Mit Dichte Kosten sparen

Erschließungs- und Folgekosten für Straße, Kanal, Trinkwasser und Strom pro Wohneinheit (WE) bei mittlerem Kostenniveau von 2017

Quelle: Bundesstiftung Baukultur: Baukulturbericht 2018/19, 2018;
Datengrundlage: Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität GbR:
www.was-kostet-mein-baugebiet.de, Zugriff: 05.2018



© Bundesstiftung Baukultur
Design auf Grundlage: Erfurth Kluger Infografik; Überarbeitung durch: Heimann und Schwantes

In Deutschland gab es 2022 einen Bestand von ca. 16,2 Mio. Ein- bzw. Zweifamilienhäuser – etwa 900.000 Gebäude mehr als noch zehn Jahre zuvor (Statistisches Bundesamt 2025). Bei einer Gesamtzahl von 19,5 Mio. Wohngebäuden bedeutet das einen Gebäudeanteil von 83 %. „Auch wenn unter Berücksichtigung der aktuell starken Zuwanderung das Bundesbauministerium bis 2030 von einem jährlichen Bedarf von mindestens 350.000 neuen Wohnungen ausgeht und dieser verstärkt durch einen bezahlbaren Geschosswohnungsbau gedeckt werden muss, werden Eigenheime ein fester Bestandteil der Neubautätigkeit bleiben – und dies trotz ihrer negativen Auswirkungen auf den Flächenverbrauch, auf den Verkehr und auf vorhandene Ortskerne und trotz der meist schlechten städtebaulichen Gestaltung in Neubaugebieten, die weder Siedlungs- noch Quartierscharakter haben“ (Bundesstiftung Baukultur 2017:38). Die aus dem Mobilitätsverhalten induzierten Umweltwirkungen, die durch das Zusammenwirken von Lagefaktoren und Bebauungsdichte verschiedener Gebäude- und Siedlungstypen bedingt sind, werden in einer anderen Studie diskutiert (Anderson 2015, siehe Kapitel 2.6).

Aus den genannten Studien können verschiedene raumplanerisch relevante Schlussfolgerungen gezogen werden: „In der wissenschaftlichen Debatte besteht ein breiter Konsens, dass die Kosten für die Bereitstellung, den Betrieb und den Unterhalt von Infrastrukturanlagen und -einrichtungen in ausgeprägter Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur stehen. Danach ist eine gering verdichtete, disperse Siedlungsweise infrastrukturaufwändiger als eine stärker kompakte Siedlungsform mit höherer baulicher Dichte“ (Schiller/Siedentop 2005:84). Allgemein betrachtet wirkt sich die bauliche Dichte unmittelbar auf den technischen Erschließungsaufwand eines baulich genutzten Gebiets aus, da mit abnehmender baulicher Dichte die Baustoffintensität für Straßen und Leitungswege je Einwohner oder Wohnung zunimmt. Auf kommunaler Ebene ist die räumliche Anordnung neuer Baugebiete relevant, da „eine disperse bauliche Entwicklung an dezentralen Standorten gegenüber einer auf den Kernsiedlungsraum der Stadt bzw. Gemeinde orientierten Siedlungsweise bis zu vierfach höhere Infrastrukturkosten verursachen kann“ (ebd.). Hinzu kommt, dass bei einer Konzentration der Bautätigkeit auf größere Siedlungseinheiten Skaleneffekte wirksam werden, wie z.B. Kostenvorteile von größeren Anlagen oder Einrichtungen der technischen und sozialen Infrastruktur (ebd.).

Einschränkend ist allerdings zu berücksichtigen, „dass Studien, die mit prototypischen Siedlungsstrukturen (modellhafte Baugebiets- oder Gemeindetypen) operieren und dadurch siedlungsstrukturelle Faktoren isoliert untersuchen können, auf höhere Kostenunterschiede bzw. Einsparpotenziale schließen als Untersuchungen, die reale Siedlungsstrukturtypen auf der Basis tatsächlicher Kostenermittlungen vergleichen“ (Schiller/Siedentop 2005:85). In Forschungsarbeiten, die mit Durchschnittskostensätzen operieren, wurden tendenziell höhere Einsparpotenziale nachgewiesen, als wenn in den Kalkulationen Grenzkostenmodelle verwendet wurden. Außerdem werden Infrastrukturkosten stark von lokalen Faktoren (wie z.B. topografische Bedingungen, Baugrundeigenschaften oder lokalen Infrastrukturkapazitätsreserven) determiniert, die einen stärkeren Einfluss als allgemeine siedlungsstrukturelle Eigenschaften wie die städtebauliche Dichte haben können (ebd.).

Unter länger anhaltenden Schrumpfungsprozessen kommt es zwangsläufig zu einer Entkopplung von baulicher Dichte und Bevölkerungsdichte. Kurz- und mittelfristig führen steigende Wohnungsleerstände und Brachflächenbestände dann unweigerlich zu einer Zunahme spezifischer Infrastrukturaufwendungen pro Kopf. „Konzentriert sich der Leerstand – wie in Ostdeutschland de facto der Fall – auf Wohngebiete im Geschosswohnungsbau, geht der Effizienzvorteil gegenüber Einfamilienhausgebieten geringerer Dichte mehr und mehr verloren“ (Schiller/Siedentop 2005:88). Hieraus leitete sich die Forderung nach einem infrastruktureffizienten Stadtumbau ab, wie ein flächenhafter „Rückbau mit dem kompletten Abriss ganzer Siedlungseinheiten und der damit möglichen Stilllegung der entsprechenden Infrastrukturabschnitte“ (Schiller/Siedentop 2005:89). Infrastrukturkosten werden so zu einem begrenzenden Faktor für die städtebaulichen Gestaltungsspielräume.

Im Hinblick auf das Ziel einer 2000-Watt-Gesellschaft wurde in der Ressourcenstrategie „Bauwerk Stadt Zürich“ (Stadt Zürich 2009) untersucht, wie eine nachhaltige Bewirtschaftung von Bestand und Neubau dichter urbaner Systeme gestaltet werden kann. Die Grundlage für die Ressourcenstrategie bildete ein Ressourcenmodell, in welchem die Mengen und Qualitäten der eingesetzten Baustoffe wie Beton, Asphalt und Mauerwerk

durch eine dynamische Stoffstromanalyse bilanziert wurden, um aus der Bewertung der Materiallager und Baustoffströme Handlungsoptionen abzuleiten. Das mineralische Baustofflager für die Stadt Zürich betrug im Referenzjahr 2005 insgesamt rund 100 Mio. Tonnen. Das sind ca. 195 Tonnen pro Einwohner und entspricht ungefähr dem schweizerischen Durchschnitt (Stadt Zürich 2009:9, Rubli et al. 2014:548). Dieses Materiallager verteilt sich zu rund 70 % auf Gebäude und 30% auf Infrastrukturbauten. Anhand von dynamischen Simulationen für die Szenarien KONSTANT, SANIEREN, ERSETZEN und KOMBINIERT wurde gezeigt, dass durch eine verstärkte Sanierungstätigkeit und dem Einsatz von Recyclingmaterialien (z.B. RC-Beton) bis zum Jahr 2050 erhebliche Primärrohstoffeinsparungen möglich sind. Deutlich wurde auch, dass sich ein materialintensiver Umbau des Gebäudeparks aber nur rechtfertigen lässt, wenn dies gleichzeitig zu einer deutlichen Reduktion des Energiebedarfs führt (Rubli et al. 2014:551).

Um den Gebäudepark langfristig in Richtung 2000-Watt-Gesellschaft zu entwickeln, wurde daher für die Szenarien zusätzlich der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser simuliert. Hierfür wurde im Modell bei jedem Eingriff in den Gebäudepark der spezifische und zeitabhängige Energiestandard miterfasst. Die Simulationen zeigen, dass im Szenario KOMBINIERT der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser auf 1000 Watt pro Person reduziert werden kann, was rund 40 % des heutigen Bedarfs entspräche (Rubli et al. 2014:551). Im Hinblick auf die voraussichtlich steigenden Stoffflüsse aus Gebäude- und Infrastrukturrückbau müssen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des urbanen Materiallagers die Kapazitäten der Aufbereitungsanlagen stark erhöht und ein Markt für die Produkte geschaffen werden. Dieser sollte insbesondere durch die Nachfrage aus kommunalen Bauaktivitäten stimuliert werden. Besonders in der Infrastruktur liegt ein bedeutendes Rohstofflager vor, das als Quelle für zukünftige Sekundärressourcen genutzt werden sollte.

2.3 Lebenszyklusanalysen und Stoffströme von Gebäuden

Lebenszyklusanalysen (engl. Life Cycle Assessment, LCA) sind eine etablierte Methode, um Umweltauswirkungen von Produkten wie Gebäuden oder deren Bauteile zu bewerten, die gebundene graue Energie der Prozessketten zu erfassen sowie Kreislaufpotenziale zu identifizieren (Spreng 1994, Frischknecht 2004, Sohn et al. 2020). Bereits seit den 1990er Jahren wurden die methodischen Ansätze zu einer ganzheitlichen Betrachtung von Energie- und Stoffströmen und Lebenszykluskosten von Gebäuden entwickelt (u.a. Kohler 1998, Lützkendorf 2000, Kohler 2002) und in den nachfolgenden Jahren systematisch verfeinert (u.a. König et al. 2009). Mittlerweile ist das Thema graue Energie für die Herstellung oder Sanierung von Gebäuden methodologisch gut erforscht, auch wenn aufgrund der technologischen Weiterentwicklung von Herstellungsverfahren und Energiesystemen ein stetiger Aktualisierungsbedarf besteht. In einer älteren Überblicksstudie wurden beispielsweise auf der Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche, 73 LCA-basierte Fallstudien aus 13 verschiedenen Ländern ausgewertet, die sowohl Wohn- als auch Bürogebäude umfassten (Ramesh et al. 2010). Bei wenig energieoptimierten Gebäuden fällt die Betriebsenergie mit einem Anteil von 80-90 % besonders stark ins Gewicht, während die graue Energie teilweise nur etwa 10-20 % ausmacht. Niedrigenergiegebäude, die durch passive und aktive Maßnahmen wie verbesserte Dämmung, Wärmerückgewinnung oder den Einsatz von Wärmepumpen optimiert wurden, weisen im Lebenszyklus eine deutlich bessere Energiebilanz auf als konventionelle Gebäude - und in der Regel auch als selbstversorgende Gebäude (bilanzielle Null-Emissions-Gebäude). Letztere brauchen zwar keine zusätzliche fossile Betriebsenergie, die aufwendigen technischen Installationen binden jedoch eine größere Menge an grauer Energie. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Klimazonen und realisierten Standards weisen die Daten große Spannweiten auf, und auch die Erhebungen zur grauen Energie sind trotz eines Anpassungsfaktors für Länder mit einem hohen Anteil an fossilen Energiequellen aufgrund inkonsistenter Daten nur bedingt miteinander vergleichbar (vergl. Ibn-Mohammed et al. 2013: 237).

Erkenntnisreiche Informationen für die Planungspraxis lassen sich aus Studien gewinnen, in denen einzelne Planungsparameter systematisch variiert und deren ökologischen Auswirkungen miteinander verglichen werden. So hatte die Studie „Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden“ (König 2017) das Ziel, die ökologischen

und wirtschaftlichen Optimierungsmöglichkeiten im Wohnungsbau zu analysieren und zu bewerten. Hierfür wurde am Beispiel eines typischen zweigeschossigen Einfamilienhauses ohne Keller eine vergleichende Analyse verschiedener Bauweisen, energetischer Standards und Heizsysteme auf Basis einer detaillierten Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung durchgeführt. Für ein Einfamilienhaus mit einer Bruttogrundfläche von 185 bis 200 m², Nettoraumfläche von 150 m² und Wohnfläche von ca. 135 m² wurden sechs Bauweisen, drei energetische Standards (EnEV 2016, 30 kWh, 15 kWh) und vier Heizsysteme (Gas-Brennwert, Holzpellet, Luft-Wasser-Wärmepumpe, Wasser-Wasser-Wärmepumpe) analysiert. Aus der Kombination dieser Parameter ergaben sich 72 Varianten, die unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15804 und EN 15978 bilanziert wurden (König 2017:1-15). Die Ergebnisse zeigen, dass bei besseren Energiestandards der Primärenergieaufwand und das GWP für die Konstruktion leicht ansteigt, die Mehrverbräuche in der Herstellung jedoch durch die Energieeinsparungen im Betrieb überkompensiert werden. Eine zentrale Erkenntnis betrifft den Zusammenhang zwischen thermischer Masse und Heizwärmebedarf.

Während Massivbauweisen gegenüber vergleichbaren Holzbauweisen ein höheres GWP für die Konstruktion aufweisen, weisen diese jedoch beim Heizwärmebedarf Einsparungen von bis zu 10 % auf. Zudem ist der sommerliche Wärmeschutz bei massiven Bauweisen mit bis zu 75 % weniger Überwärmungsstunden signifikant besser. Mit hybriden Bauweisen lassen sich beide Vorteile miteinander kombinieren. Hinsichtlich der Lebenszykluskosten schneiden Varianten mit robusten, langlebigen Materialien und einer effizienten Wärmetechnik besonders gut ab. Höhere Investitionen in bessere Dämmung und robuste Anlagentechnik zahlen sich durch geringere Energie- und Instandhaltungskosten aus. Die günstigsten Varianten (über 50 Jahre Barwert) sind die Ziegelbauweise mit Gas-Brennwertheizung (2.350 €/m² BGF) und die Holzrahmenbauweise mit Holzpellettheizung (König 2017:1-26). Entscheidend für die Reduktion von Umweltwirkungen sind Strategien zur Erhöhung der Nutzungsdauer, der thermischen Speicherkapazität und zur emissionsarmen Energieversorgung. Langlebige, flexible Grundrisse verbessern die Bilanz deutlich. Die Wahl des Dämmstoffs hingegen hat eine vergleichsweise geringe Wirkung auf die Gesamtköbilanz.

In der Studie „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus“ (Mahler et al. 2019) wurde der kumulierte Energieaufwand (KEA), die CO₂-Emissionen (GWP) sowie die Herstellungs- und Betriebskosten verschiedener Gebäudekonzepte analysiert. Die Untersuchungen wurden für Neu- und Bestandsgebäude anhand von ausgewählten Gebäudetypen für die Energiestandards EnEV 2016, Passivhaus, Null- und Plusenergiehaus durchgeführt. Für den Neubaubereich wurde ein mittelgroßes Mehrfamilienhaus mit 20 Wohneinheiten und ein Reihenendhaus mit einer Belegungsdichte von 39 m² Wohnfläche pro Person ausgewählt (ebd.:10). Beim Gebäudebestand wurde auf die deutsche Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt zurückgegriffen (IWU 2015). Aus den Kombinationen von sechs Gebäudetypen mit unterschiedlichen Ausführungen in Gebäudehülle und Anlagentechnik wurden insgesamt 400 Varianten hinsichtlich der oben genannten Kriterien ausgewertet.

Ein wesentliches Ergebnis der Studie ist, dass der Energiestandard allein keine Klimaneutralität garantiert. Die Wahl der Wärmeversorgung, insbesondere der Anteil erneuerbarer Energien, hat entscheidenden Einfluss auf die CO₂-Bilanz. Während Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaik hohe Einsparungen ermöglichen, bleiben fossile Systeme auch bei effizienter Hülle klimaschädlich. In der Studie wurde auch die graue Energie der Varianten ausgewertet, da diese bei einem reduzierten Energiebedarf und der Nutzung erneuerbarer Energien eine höhere Relevanz bekommt. „Bei typischen Neubauten betragen die 'grauen Emissionen' 10-16 kg CO₂-Ä./((m² Wfl.*a)). Dies entspricht einem Anteil von 25-40 % der CO₂-Emissionen für die Konstruktion und den Energiebedarf in der Nutzungsphase. Beim Plusenergiegebäude führt die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation der nutzungsbedingten CO₂-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben. Durch den Bestandserhalt bei Gebäudesanierungen betragen die 'grauen Emissionen' je nach Gebäudetyp 3-8 kg CO₂-Ä./((m² Wfl.*a)). Dies entspricht einem Anteil von 10-25 % der CO₂-Emissionen für die Konstruktion“ (Mahler et al. 2019:9). Zusammenfassend empfiehlt die Studie eine strategische Kombination aus effizienter Hülle, regenerativer Energieversorgung und lokaler Stromproduktion.

Der Einsatz von Holzkonstruktionen kann im Vergleich zu mineralischen Bauweisen nicht nur den Bedarf an grauer Energie reduzieren, sondern wird bisweilen - je nach getroffenen Vorannahmen und Bilanzierungsverfahren – auch als Kohlenstoffsенke verbucht. In der Studie "Umsetzung einer ressourcenschonenden Quartiersentwicklung in der ökologischen Mustersiedlung Prinz-Eugen-Park in München" (Hafner 2021) wurde die mit etwa 570 Wohneinheiten bislang größte zusammenhängende Holzbausiedlung Deutschlands bilanziert. Neben Energieeffizienzstandards von mindestens KfW-55 bis teilweise KfW-40-Standard Niveau und einem ökologischen Freiflächenkonzept, das für eine hohe Biodiversität sorgen soll, sind in der Siedlung durch den vermehrten Einsatz von Holz und Holzwerkstoffe insgesamt über 12.500 Tonnen CO₂ gebunden (Hafner 2021:17). Je nach Geschossanzahl und Gebäudeklasse wurden verschiedene Konstruktionsvarianten realisiert, während bei den Ausführungen der Außenwände neben Holzmassivbau- und Hybridbauweisen überwiegend Holzrahmenbauweisen zur Ausführung kamen.

Neben der Substituierung von mineralischen Baustoffen (insbesondere Beton) durch Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wurden auch der Einfluss von Recyclingstrategien und der Einsatz von Recyclingbaustoffen auf ein nachhaltiges Gebäudemanagement sowie auf Neubauszenarien untersucht. In der Untersuchung "Sekundärstoffe aus dem Hochbau" (Bimesmeier et al. 2020) wurden die energetischen Aufwände und ökologischen Potenziale der Kreislaufführung von Baumaterialien im Hochbau analysiert. Im Fokus stand der Vergleich von Sekundär- und Primärstoffen unter Verwendung eines dreistufigen Bilanzrahmens, angelehnt an die DIN EN 15804. Zehn Bauproduktgruppen, darunter Beton, Ziegel, Dämmstoffe und Kunststoffe, wurden hinsichtlich Aufbereitung, funktionaler Substitution und Energieaufwand verglichen.

Die Ergebnisse belegen, dass in den meisten Fällen - v. a. bei Kunststoffen und Dämmstoffen mit hohem Primärenergiebedarf - Recycling energetisch vorteilhaft ist. Bei mineralischen Baustoffen ist besonders der stoffliche Nutzen durch Rohstoffschonung relevant, auch wenn der energetische Vorteil geringer ausfällt. Unterschiedliche Rezepturanpassungen und zusätzliche Verfahrensschritte beeinflussen die Energieaufwendungen im Recyclingprozess. Auch Transportdistanzen stellen einen kritischen, aber schwer quantifizierbaren Einflussfaktor dar. Die Studie liefert ein methodisch fundiertes Instrumentarium für die ökobilanzielle Bewertung von Rezyklaten und zeigt, dass eine qualitätsgesicherte, regionale Kreislaufführung wesentliche Beiträge zur Ressourceneffizienz leisten kann, sofern normative, technologische und marktbezogene Hemmnisse abgebaut werden.

2.4 Lebenszyklusanalysen und Stoffströme von Quartieren und Infrastrukturen

Neben den zahlreichen Einzelstudien zu Gebäuden, die unter anderem ein grundlegender Bestandteil bei der Nachhaltigkeitszertifizierung nach DGNB oder BREEAM sind, gibt es auch Lebenszyklusuntersuchungen zu größeren Siedlungseinheiten oder Quartieren, die zumeist im Kontext einer umfassenderen Nachhaltigkeitsbewertung entstanden. Exemplarisch hierfür steht die Begleitforschung zum Projekt wagnisART „Gemeinschaftlich nachhaltig bauen“ (Lang/Schneider 2017). In der Studie wurde ein genossenschaftliches Wohnquartier in München analysiert, das sich bereits in der Konzeption hohe ökologische und soziale Nachhaltigkeitsziele gesetzt hat, und diese weitgehend baulich und durch gemeinschaftlich orientierte Wohnformen umgesetzt hat. Zentraler Bestandteil war ein partizipativer Planungsprozess, der durch die frühzeitige Einbindung der späteren Bewohner ressourceneffiziente und sozial nachhaltige Entscheidungen gefördert hat. Die ökologische Bewertung erfolgte nach den Standards der DIN EN ISO 14040 und EN 15978 und bezog sowohl Herstellung als auch Nutzung und Rückbau ein.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass der realisierte Passivhausstandard für deutliche Einsparungen der Betriebsenergie sorgt, dieser dennoch über Jahrzehnte der dominante Faktor für den Primärenergiebedarf bleibt. Das Stahlbetontragwerk verursacht einen erheblichen Anteil an den grauen Emissionen. Vergleichsrechnungen mit Holztragwerken zeigten hier Optimierungspotenziale auf. Zudem ist die Rolle der Tiefgaragen differenziert zu bewerten. Der Bau dieser Infrastrukturkomponente trägt erheblich zum Treibhauspotenzial und zum Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie bei. Während pro Stellplatz 12,7 Tonnen CO₂-Äquivalente

und 33,6 MWh nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf entstehen, erhöht der weitgehende Verzicht auf Stellplätze im Freiraum dessen Aufenthaltsqualität. Durch ein innovatives Mobilitätskonzept mit reduziertem Stellplatzschlüssel konnte die Anzahl an Stellplätzen bereits halbiert werden, was die Umweltwirkungen deutlich minderte.

Eine weitere Quelle zur Quartiersökobilanzierung ist das "DGNB-System zur Nachhaltigkeitszertifizierung von Quartieren". Es steht seit 2012 zur Verfügung und wurde im Jahr 2020 neu aufgelegt und erweitert. Es soll Planern, Bauherren und Kommunen als ein integrales Planungs- und Optimierungstool für eine nachhaltige Quartiersentwicklung dienen. Da jedes Quartier entsprechend seiner vorrangigen Nutzung unterschiedliche Bedürfnisse erfüllen muss, berücksichtigt das DGNB-System sieben verschiedene Quartierstypen mit unterschiedlichen Nutzungsprofilen:

- (1) Stadtquartier: gemischt genutzt es Stadtviertel mit signifikantem Wohnanteil sowie Infrastruktur und öffentlichen Freiräumen.
- (2) Businessquartier: überwiegend Büro- und Dienstleistungsnutzungen, ggf. mit verträglichem Gewerbe und Einzelhandel.
- (3) Gewerbegebiet: Quartier mit diversifizierter gewerblicher Nutzung (Produktion, Logistik, Handwerk etc.).
- (4) Industriestandort: primär industriell genutztes Areal mit einheitlicher Flächenverantwortung.
- (5) Event-Areal: Areal für temporäre hohe Besucherzahlen (Messen, Veranstaltungen, Sport, Kultur) mit flexibler Nutzung.
- (6) Resort: touristische oder Freizeit-Quartiere (z. B. Hotelanlagen) mit Campus-Charakter.
- (7) Vertical City: hochverdichtetes Hochhaus-Ensemble mit mehreren Gebäuden.

Die Mindestgröße eines zertifizierbaren Quartiers liegt bei ca. zwei Hektar und es müssen mehrere Gebäude sowie öffentliche Räume vorhanden sein. Für jedes Profil gelten spezifische Voraussetzungen (z. B. Wohnanteil 10–90% im Stadtquartier). Die Nachhaltigkeitskriterien des DGNB-Quartiersystems decken alle wesentlichen Dimensionen nachhaltiger Stadtentwicklung ab, und als zentrales Bewertungsinstrument ist auch eine Quartiersökobilanz zu erstellen (LCA auf Quartiersebene). Diese ermöglicht eine ganzheitliche ökologische Bewertung eines Stadtquartiers und beruht auf den internationalen Normen ISO 14040/14044 und der europäischen DIN EN 15978. Die Quartiersökobilanz erfasst alle gängigen Wirkungskategorien (GWP, AP, EP, ODP, POCP etc.) und ermöglicht damit einen standardisierten Vergleich der Umweltbelastungen. Damit werden sämtliche Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus erfasst, in der Regel über 50 Jahre Nutzungsdauer. Die Bilanzierung geht über die Gebäudeebene hinaus und schließt alle quartierstypischen Elemente mit ein, wie versiegelte Verkehrsflächen, Freiflächen oder technische Erschließungen. Nach eigenem Bekunden hat sich das DGNB-Quartiersystem in der Praxis zum Marktführer in Europa entwickelt und bis 2025 wurden weit über 50 Quartiere in verschiedenen Planungsphasen ausgezeichnet (Jansen 2019).

Aktuell (Stand 2025) arbeitet die DGNB an der Erweiterung des Systems auf bestehende Quartiere und Stadtteile. Bisher richtete sich die Zertifizierung vor allem an Neubau-Entwicklungsprojekte; zukünftig soll vermehrt die Transformation von Bestandsquartieren in den Blick genommen werden. Weitere Informationen: <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/quartiere>

Eine detaillierte ökologische Bewertung technischer Infrastrukturen auf Quartiersebene ist hingegen derzeit aufgrund einer fragmentierten Datenlage erschwert. Zwar existieren wissenschaftliche Einzelstudien und spezialisierte Datenbanken wie der ÖKOBAUDAT, die belastbare Kennwerte für gängige Baumaterialien liefern, doch fehlt eine systematische Differenzierung nach Bauart und Nutzungskontext, etwa zwischen verschiedenen Straßenbauklassen oder Leitungsarten. Neben der Dissertation von "Ökobilanzen in der Siedlungswasserwirtschaft" (Hügel 2000) war vor allem die Dissertation "Primärenergetische Analyse der Infrastruktur von Wohnsiedlungen" (Schuchardt 2006) eine wichtige Quelle für die Erhebung von Kennwerten zur Siedlungsinfrastruktur. In der Arbeit wurden der Primärenergieeinsatz und die Emissionen technischer Infrastrukturen über den Lebenszyklus analysiert und umfasst die Herstellung, Nutzung und Entsorgung aller relevanten Infrastrukturelemente wie Straßen, Leitungen und Beleuchtungssysteme.

Die Ergebnisse zeigen, dass der überwiegende Anteil des Energiebedarfs in der Bauphase anfällt, insbesondere bei Fahrbahnen, Wärme- und Abwasserleitungen. Die Materialwahl hat einen erheblichen Einfluss auf die Emissionsbilanz. Zementgebundene Tragschichten erweisen sich als besonders CO₂-intensiv, während Sekundärmaterialien lediglich moderate Entlastungen bieten. Auch die Qualität der Bauausführung beeinflusst den langfristigen Energiebedarf über Wartung und Instandhaltung. Die Betriebsphase einzelner Systeme, wie beispielsweise die Straßenbeleuchtung, kann den Herstellungsaufwand sogar übertreffen. Beim Rückbau zeigt sich, dass Recycling technisch möglich, aber energetisch nur begrenzt vorteilhaft ist, da Schüttgüter und Asphalt ähnliche Energieaufwendungen wie Primärmaterialien verursachen. Schuchardt empfiehlt deshalb eine vorausschauende Infrastrukturplanung, die auf langlebige, wartungsarme Materialien sowie die Integration energetischer Kriterien bei der Auswahl von Materialien und Konstruktionsweisen setzt.

Die Masterarbeit "Handlungsempfehlungen zur Klimaneutralität im kommunalen Rohrleitungsbau" (Fuchs 2023) liefert praxisnahe Empfehlungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im kommunalen Rohrleitungsbau und versteht sich als Beitrag zur Operationalisierung kommunaler Klimastrategien im Infrastrukturbereich. Am Beispiel der Berliner Wasserbetriebe wurden typische Bauprozesse im Tiefbau modelliert, in denen Neubau, Sanierung und Rückbau von Trink- und Abwasserleitungen betrachtet wurden. Methodische Grundlagen bildeten eine Lebenszyklusanalyse gemäß DIN EN 15804 sowie GHG Protocol, ergänzt durch eigene Baustellenanalysen und Interviews. Als Ergebnis der Analyse wurden als wesentliche Emissionsquellen der Einsatz fossiler Maschinen, Materialtransporte sowie die Verwendung emissionsintensiver Rohrmaterialien wie Guss und Beton identifiziert. Diese dominieren die CO₂-Bilanz. Offene Bauweisen verursachen die höchsten Emissionen, während geschlossene Techniken, wie Schlauchlining bis zu 52% weniger GWP und 23% geringere Kosten aufweisen. Die Arbeit formuliert fünf zentrale Handlungsempfehlungen: Förderung emissionsarmer Bauverfahren, Auswahl langlebiger und recycelbarer Materialien, Optimierung des Maschineneinsatzes, Integration von Klimakriterien in Ausschreibungen und Entwicklung projektbezogener Bilanzierungswerkzeuge.

2.5 Energiesystemmodelle für die Wärmeversorgung

Die Optimierung von Energiesystemen zur Wärmeversorgung auf der Gebäude- und Quartiersebene wird bereits seit mehr als 30 Jahren in vielen Forschungsprojekten untersucht. Hierbei geht es zumeist um das Zusammenwirken und die Optimierung der energetischen Qualität von Gebäudehüllflächen und Wärmeversorgungsanlagen hinsichtlich technischer, ökonomischer und nutzerabhängiger Fragestellungen. Das erfolgt sowohl für Neubau wie für Bestandsquartiere auf verschiedenen räumlichen Maßstabsebenen, in den letzten Jahren zunehmend mit einem Forschungsschwerpunkt auf der Transformation hin zu klimaneutralen Quartieren.

Die Studie „Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen“ (Roth et al. 1980) zählt zu den frühesten Arbeiten, in denen der Zusammenhang zwischen städtebaulicher Dichte und Eignung unterschiedlicher Wärmeversorgungssysteme systematisch untersucht wurde. Die Studie verband erstmals die Bewertung von Wärmeversorgungssystemen mit siedlungsstrukturellen Merkmalen. Hierfür wurden in einem differenzierten Raumtypmodell zunächst vier übergeordnete Raumtypen definiert (Kernstadt, Außenzone, Mittelstädte und ländlicher Raum), aus denen neun wärmeversorgungsrelevante Siedlungstypen mit typischen Datenprofilen abgeleitet wurden. Unterteilt nach Alt- und Neubau wurden in einer Matrix zwölf Wärmeversorgungslösungen bewertet, darunter Fernwärme, Blockheizkraftwerke, Solaranlagen, Wärmepumpen und Holzheizungen (Prytula 2011:125). Ein zentrales Ergebnis der Studie war, dass die Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit der Versorgungssysteme maßgeblich von der Siedlungsdichte abhängen. Fernwärme ist nur in ausreichend verdichteten Gebieten sinnvoll, während dezentrale Systeme in gering verdichteten Räumen ökonomische und ökologische Vorteile bieten. Im Kontext einer weitgehend auf fossiler Energie beruhenden Wärmeversorgung bewirken Maßnahmen zur energetischen Sanierung des Gebäudebestands, insbesondere die Verbesserung der Wärmedämmung, eine größere Energieeinsparung als der Einsatz neuer Versorgungstechnologien. Empfohlen wurden technologieoffene, raumtypenspezifische Versorgungslösungen.

In jüngeren Arbeiten lag der Forschungsfokus auf der Bereitstellung und Integration erneuerbarer Energiesysteme im Quartiersmaßstab. Im Forschungsprojekt "UrbanReNet" (Hegger et al., 2015) wurde eine GIS-gestützte Bewertung regenerativer Energiesysteme auf Quartiersebene entwickelt. Die Bilanzierungsgrenze wurde schrittweise vom Einzelgebäude auf Quartiersebene ausgeweitet mit dem Ziel, die Energieflüsse im urbanen Maßstab abzubilden und eine Systematik für regenerative Energiekonzepte auf Quartiersebene zu entwickeln. Hierfür wurden in dem Projekt drei Handlungsfelder betrachtet:

- (1) der Stadtraum mit Bebauungsstruktur, Freiraum und Nutzungen,
- (2) die Anlagentechnik mit Technologien zur Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung und
- (3) die Modellierung zur quantitativen und qualitativen Bewertung von Bedarfen und Potenzialen mit einem objektbasierten Optimierungsmodell.

In der ersten Projektphase wurden Stadträume mit ähnlicher Struktur und ähnlichen Eigenschaften hinsichtlich des Energiebedarfs und der Potenziale analysiert und eine Typologie energetischer Stadtraumtypen (EST) erarbeitet. Jeder dieser Stadtraumtypen ist durch eine charakteristische Bau- und Freiraumstruktur, typische Bebauungsdichten, städtebauliche Körnung (Größe der Baublöcke), Geschossigkeit und Nutzungsart gekennzeichnet. Die EST sind modulare Stadtbausteine, die zusammengesetzt eine städtische Agglomeration bilden. Insgesamt wurden 13 EST definiert, die gemäß ihrer vorherrschenden Nutzung in vier Gruppen eingeteilt wurden: (1) überwiegend Wohnnutzung (EST1–5), (2) Mischnutzung (EST 6–8), (3) gewerblich/industrielle Nutzung (EST 9–10) und (4) städtische Freiräume (EST 11–13). Die Definition der Typen wurde bewusst so gewählt, dass reale Siedlungsstrukturen – trotz regionaler Unterschiede – jeweils einem der 13 Typen zugeordnet werden können. Für einige Stadtraumtypen wurden Untertypen eingeführt, um wichtige strukturelle Variationen abzubilden (z. B. EST 1a/1b für Einfamilien- versus Mehrfamilienhausgebiete, EST 4a/4b für Zeilenbebauung versus Punkt-Hochhäuser). Für jeden EST wurde ein Steckbrief mit den wichtigsten Kennwerten (z.B. spezifische Heizwärmebedarfe, solare Erträge) erstellt, die als Grundlage zur energetischen Bewertung von Quartieren dienen.

In der zweiten Projektphase wurde diese Typologie weiterentwickelt und um einen EST-Eignungskatalog ergänzt, der je Typ geeignete Versorgungstechnologien empfiehlt. Hochverdichtete Zentren eignen sich für die Nutzung von Fernwärme und Abwasserwärme, aufgelockerte Siedlungen weisen größere Potenziale für die Nutzung von Geothermie und Biomasse auf. Für alle EST wurden die lokalen Nutzungspotenziale von erneuerbaren Energien quantifiziert. Dazu zählen solare Einstrahlung (Photovoltaik, Solarthermie), oberflächennahe Geothermie, Abwärme aus Abwasser sowie Biomasse aus organischen Abfällen. Hiermit konnten die spezifischen Unterschiede zwischen den EST aufgezeigt werden, da beispielsweise große Dachflächen in dicht bebauten Quartieren höhere Solarerträge ermöglichen, während in locker bebauten Gebieten mehr Flächen für die geothermische Wärmegewinnung oder zur Biomasseproduktion verfügbar sind.

Für die Informationsvernetzung wurde in der zweiten Phase ein datenbankgestütztes Simulationswerkzeug entwickelt, mit dem Planer verschiedene Energiekonzepte auf Quartiersebene simulieren und bewerten können. Dieses Softwaretool besteht aus einem Daten- und einem Vernetzungsmodul, mit dem sich Quartierssegmente durch einen Abgleich von Energiebedarfen zu lokalen Erzeugungs-, Speicher- und Verteiloptionen energetisch bilanzieren lassen. Das dynamische Vernetzungsmodul ermöglicht eine stundenweise aufgelöste Darstellung der Energieströme, die Verschiebung von Potenzialen über Speicher sowie die Vernetzung von Verbrauchern und Erzeugern zur Deckung offener Bedarfe im Quartier. Eine intelligente lokale Vernetzung kann den energetischen Nutzungsgrad deutlich erhöhen, indem Überschüsse genutzt und Lastspitzen reduziert werden. Da in Bestandsquartieren große Wärmelasten und erhebliche erneuerbare Potenziale vorliegen, ist die Ausweitung solcher Nahwärmelösungen auf den Gebäudebestand entscheidend. Die Software wurde in Anlehnung an ingenieurtypische Objektmodelle in Hierarchie-Ebenen strukturiert (Tool-Ebene, Modell-Ebene, Gebietsebene, Sektions- bzw. Quartiersebene). Durch diese objekt- und containerbasierte Struktur können die räumlichen Bezüge und funktionalen Zusammenhänge eines Quartiers wesentlich genauer abgebildet werden als in früheren, statischen Bilanzierungsansätzen.

Das UrbanReNet-Tool erlaubt es nun, ganze Stadtquartiere mit all ihren energetischen Bedarfen und Potenzialen abzubilden und verschiedene Versorgungs- oder Sanierungsszenarien zu simulieren. Die Eingabe erfolgt dabei top-down anhand weniger Parameter. Anstelle einer detaillierten Eingabe von Gebäudedaten werden für Teilgebiete des Quartiers entsprechende Stadtraumtypen, Baualtersklassen und Sanierungsstände ausgewählt. Dieses Prinzip reduziert erheblich den Aufwand der Datenerhebung. So können typische Stadtschnitte von 10 bis über 100 Gebäuden schnell energetisch erfasst und simuliert werden. Die Simulation liefert Entscheidungshilfen, um erste Entwicklungsszenarien oder energetische Sanierungskonzepte auf Quartierebene durchzuspielen. Die UrbanReNet-Steckbriefe und das Softwaretool geben Planern, Energieversorgern und Kommunen ein Instrument an die Hand, um qualifizierte Entscheidungsgrundlagen zur Stadtentwicklung zu treffen. Die Studie verdeutlicht das Potenzial einer integrierten quartiersbezogenen Energieplanung für die Umsetzung von Klimaschutzzielen.

In den nachfolgenden Jahren wurden weitere Studien durchgeführt, um Bestands- und Neubauquartiere klimaneutral zu entwickeln. Exemplarisch hierfür steht das Projekt "STADTQUARTIER 2050", ein interdisziplinäres Forschungs- und Demonstrationsvorhaben, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Zeitraum von 2018 bis 2024 im Rahmen der Förderinitiative „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ gefördert wurde.

Im Mittelpunkt stand die modellhafte Transformation zweier Quartiere in Stuttgart und Überlingen mit dem Ziel, beispielhafte Maßnahmen für sozialverträgliche, klimaneutrale Stadtquartiere zu entwickeln und übertragbare Konzepte für andere Städte abzuleiten. Die städtebauliche Planung für das Areal des ehemaligen Bürgerhospitals in Stuttgart sah eine Umnutzung und Nachverdichtung zu einem allgemeinen Wohngebiet mit ca. 660 Wohneinheiten für rund 1.500 Menschen sowie eine Ansiedlung von Dienstleistungs- und Handwerksbetrieben vor (Schrade et al. 2020:5). Ausgehend von einer Energiebedarfs- und Potenzialstudie zur Nutzung erneuerbarer Energien wurde das Areal durch Maßnahmen wie ein 3-Leiter-Nahwärmenetz, Photovoltaikanlagen und hocheffizienter Gebäudehülle in ein klimaneutrales Wohnquartier umgewandelt. In Überlingen erfolgte ebenfalls eine energetische Sanierung von Bestandsgebäuden am Hildegardring sowie ein Neubau am Schättlisberg. Die Energieversorgung erfolgte über eine Kombination aus einer 4.300 m² großen Solarthermie-Anlage, die zusammen mit einer Holzhackschnitzelheizung, zwei Erdgas-Spitzenlastkessel und einem mobilen Erdgas-Blockheizkraftwerk die nachhaltige Energieversorgung für das Quartier bildete.

Zentrale technische Innovationen des Projekts sind die Entwicklung detaillierter Energiebedarfsprofile auf Basis feingranularer Nutzerdaten sowie umfassende Lebenszyklusanalysen zur Bewertung der Umweltwirkungen. Ein Monitoringkonzept gewährleistete die laufende Erfolgskontrolle und bot die Grundlage für Optimierungen während der Umsetzungsphase. Ein besonderer Fokus lag auf der sozialen Dimension der Energiewende. Die Partizipation der Bewohner wurde aktiv gefördert, u. a. durch Tage der offenen Tür, Fokusgruppen und Umfragen. Zur Motivation energiebewussten Verhaltens wurden Bonussysteme entwickelt, die individuelle Einsparmaßnahmen belohnten (Schrade et al. 2022).

Zur Unterstützung von Planung und Umsetzung wurden digitale Werkzeuge erarbeitet, darunter das Tool „Klimaneutral Easy“, das kommunalen Entscheidungsträgern als praxisnaher Leitfaden dient. Eine eigens entwickelte Quartiers-App erlaubt es Bewohnerinnen und Bewohnern, den eigenen Energieverbrauch zu überwachen und individuelle Einsparpotenziale zu identifizieren. Der „Grid Optimizer“ hilft, lokale Energieflüsse durch Nutzung von Wetterprognosen zu optimieren. Die im Projekt entwickelten Ökobilanzmodelle wurden in das Planungstool „District ECA“ integriert, um eine kombinierte energetische und ökologische Stadtplanung zu ermöglichen. Dies erleichtert die Bewertung und Optimierung von Quartierskonzepten hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen. Im Projekt wurden sowohl zentrale als auch dezentrale Energieversorgungssysteme analysiert, um ihre Umweltauswirkungen umfassend zu bewerten. Die Wahl zwischen Neubau und Sanierung sowie das angestrebte energetische Niveau haben direkten Einfluss auf die Umweltwirkungen. Höhere energetische Standards wie EH40 führen zu erhöhtem Materialeinsatz und damit zu höheren konstruktionsbedingten Emissionen.

Beispielsweise trägt die Herstellung einer Sole-Wasser-Wärmepumpe erheblich zu den Emissionen bei, wobei Materialien wie Kupfer einen hohen Massenanteil ausmachen. Alle Ergebnisse sind in den Abschlussberichten und Leitfäden dokumentiert und stehen auf der Projektwebseite zur Verfügung: <https://www.stadtquartier2050.de/>

2.6 Ansätze zu einer sektorübergreifenden Quartiersbilanzierung

Die Vielzahl unterschiedlicher Handlungsfelder in Quartieren erfordern unterschiedliche Methoden zur Analyse von Energie- und Stoffströmen. Neben Ökobilanzen werden häufig Stoffflussanalysen (SFA) angewendet, die für eine ökologische Bewertung nicht automatisch auf standardisierte Datenbanken zurückgreifen. Häufig werden diese mit Systemanalysen (z.B. systemdynamische oder agentenbasierte Modellierungen) oder mit geographisch-räumlichen Werkzeugen oder Informationssystemen kombiniert, um fachdisziplinübergreifende und raumbezogene Erkenntnisse zu gewinnen, was zu multimodalen und multikriteriellen Modellen für sektorübergreifende Quartiersbilanzierungen führt.

Die Dissertation „Ein integrales Energie- und Stoffstrommodell als Grundlage zur Bewertung einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme“ (Prytula 2011) untersuchte die Frage, wie urbane Systeme mit hoher Bevölkerungsdichte nachhaltig mit Subsistenzgütern versorgt werden können, da angesichts der ökologischen und ressourcenbezogenen Krisen die zunehmende Entkoppelung der Städte von ihren regionalen Versorgungsräumen nicht zukunftsfähig erscheint. Zur Beantwortung dieser Frage wurde ein integrales Energie- und Stoffstrommodell entwickelt, das die Wechselwirkungen zwischen urbanem Ressourcenbedarf und regionalen Landnutzungssystemen analysiert (Prytula 2011:V). Im Modell wurden vier zentrale Teilsysteme der urbanen Versorgung (Ernährung, thermische Gebäudekonditionierung, Haushaltsstrom und Verkehr) berücksichtigt, wobei zwischen somatischer Energie (Nahrungs- und Futtermittel) und extrasomatischer Energie (technische Energieflüsse) unterschieden wurde. Da diese Systeme unter der Randbedingung einer nachhaltigen, post-fossilen Energieversorgung um dieselbe begrenzte Ressource (Landfläche) konkurrieren, kann die Flächeninanspruchnahme als zentraler Indikator für die Nachhaltigkeitsbewertung urbaner Systeme dienen. Im Unterschied zur Methode des ökologischen Fußabdrucks wurde nicht nur der rechnerische Flächenbedarf ermittelt, sondern eine raum-zeitliche Betrachtung vorgenommen. Die Bilanzierung erfolgte auf der Basis statistischer Verbrauchsdaten, Flächenkennwerte und technischer Wirkungsgrade. Als räumliche Systemgrenze diente die Region Berlin-Brandenburg (Prytula 2011:130ff).

Ein besonderes Augenmerk lag auf der Bilanzierung der Wärmeversorgung von Gebäuden, die etwa ein Drittel des Endenergiebedarfs in Deutschland ausmachen. Hierfür wurde exemplarisch der Bestand der Berliner Wohngebäude vier Stadtstrukturtypen zugeordnet, die unter Verwendung typischer Gebäudeprofile mit drei verschiedenen Energiekennwerten und acht Wärmeversorgungsvarianten bilanziert wurden. In Verbindung mit dem städtischen Mengengerüst der jeweiligen Stadtstrukturtypen wurde so der Gesamtenergiebedarf für die drei Energiestandards abgeschätzt und in Abhängigkeit des gewählten Wärmeversorgungssystems die Flächeninanspruchnahme für die Nutzung regenerativer Energieträger ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass selbst unter optimierten Sanierungs- und Versorgungsszenarien eine vollständig nachhaltige Versorgung mit erneuerbaren Energien auf Basis regionaler Landnutzungssysteme gegenwärtig nicht realisierbar ist, da der Ressourcenbedarf der vier Teilsysteme die regionalen Flächenpotenziale überschreitet. Allein der Flächenbedarf für Ernährung beansprucht hypothetisch mit etwa 2.400 m² pro Person und Jahr bereits die durchschnittlich zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Flächen des Brandenburger Umlandes. Ähnlich hohe Flächenbeanspruchungen ergeben sich für die Bereitstellung von Haushaltsstrom durch Biomasse oder Solarenergie, sowie insbesondere bei der Erzeugung von Biokraftstoffen für den Individualverkehr, die mit bis zu 4.600 m² pro Person und Jahr berechnet wurden. Technische Effizienzgewinne allein reichen nicht aus, um die Flächenkonkurrenzen zwischen Ernährung, Mobilität, Strom- und Wärmeversorgung aufzulösen. Aufgrund unzureichender Flächenpotenziale sind für eine nachhaltige Wärmeversorgung

strukturelle Veränderungen in der Flächennutzung, eine Reduktion der Konsum- und Wohnflächenansprüche sowie ein Technologiewechsel hin zu einer weniger flächenabhängigen Nutzung erneuerbarer Energien erforderlich (z.B. PV und Solarthermie auf Dächern, Geothermie oder Windstromimporte), um eine ökologisch tragfähige urbane Entwicklung zu ermöglichen (Prytula 2011:251ff).

In der Dissertation „Stadt als System“ (Anders 2016) wurde ein methodisches Instrument zur systematischen Bewertung der Wechselwirkungen zwischen städtebaulichen Parametern und Nachhaltigkeitsindikatoren entwickelt. Ausgangspunkt der Arbeit war die Feststellung, dass viele bisherige Planungsansätze isolierte Optimierungen vornehmen, ohne die Gesamtzusammenhänge urbaner Systeme zu erfassen. Daher wurde ein integratives Modell entwickelt, das Stadtstruktur, Ressourcennutzung und soziale Effekte gemeinsam analysiert. Kernstück der Arbeit ist das sogenannte Parameter-Indikator-Wechselwirkungsmodell. Es untersucht, wie sich zentrale städtebauliche Parameter wie Dichte, Nutzungsstruktur, Erschließung und Mobilitätsmuster auf Umweltindikatoren wie Energieverbrauch, Infrastrukturkosten, Stadtklima und soziale Verträglichkeit auswirken. Die Methodik basiert auf einer Sensitivitätsanalyse nach Frederic Vester, die systemische Rückkopplungseffekte berücksichtigt. Durch die Digitalisierung dieser Methode als ein planungsunterstützendes Werkzeug soll es Planungsteams und Stakeholder erlauben, Varianten in Echtzeit zu simulieren und interdisziplinär zu bewerten. Damit wird eine dialogorientierte, wissensbasierte Entscheidungsgrundlage geschaffen, welche die frühe Planungsphase qualitativ verbessern soll.

Die Anwendung erfolgte anhand realer Quartiersbeispiele, bei denen unterschiedliche Entwicklungsvarianten analysiert wurden. Es zeigte sich, dass erhöhte Dichte in bestimmten Fällen zwar ökologisch vorteilhaft, aber sozial oder klimatisch nachteilig sein kann. Das Tool erlaubt es, Zielkonflikte sichtbar zu machen und Priorisierungen in einem partizipativen Prozess gemeinsam zu entwickeln. Durch die systematische Modellierung von Wechselwirkungen können integrierte, nachhaltige Lösungen frühzeitig entwickelt und visualisiert werden. Die Arbeit schließt eine methodische Lücke zwischen datenbasierter Stadtforschung und qualitativen Planungsinstrumenten und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Operationalisierung von Nachhaltigkeitszielen in der frühen Planungsphase.

Die Arbeit „Expanding the use of life-cycle assessment to capture induced impacts in the built environment“ (Anderson 2015) (dt.: Ausweitung der Anwendung der Ökobilanzierung zur Erfassung induzierter Auswirkungen in der bebauten Umwelt) erweitert die klassische Lebenszyklusanalyse durch die Integration sogenannter „induzierter Effekte“, die durch die Lage und Nutzung urbaner Strukturen verursacht werden. Während konventionelle LCAs die Bau- und Betriebsphase von Gebäuden in den Mittelpunkt stellen, berücksichtigt Anderson zusätzlich die Umweltauswirkungen, die durch Mobilitätsverhalten und Infrastrukturbedarf am jeweiligen Standort entstehen. Im Zentrum der Arbeit stand eine Fallstudie der Metropolregion München, in der verschiedene Gebäude- und Siedlungstypen (Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, Mehrfamilienhaus) an drei unterschiedlichen urbanen Lagen analysiert werden (Innenstadt, Stadtrand und suburbane Peripherie). Für jeden Typ wurden die Bau-, Betriebs- und Verkehrsemissionen bilanziert. Die Methodik kombiniert damit prozessbasierte, inputorientierte und hybride LCA-Modelle, um ein vollständiges Bild der Umweltwirkungen zu erzeugen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Verkehrsemissionen bis zu 50 % der Gesamtemissionen eines Haushalts ausmachen können. Insbesondere am Stadtrand fallen hohe Belastungen an, bedingt durch größere Flächenverbräuche, längere Distanzen und eine höhere PKW-Nutzung. Die Innenstadt dagegen zeigt trotz höherer Bebauungsdichte geringere Emissionen, da kürzere Wege und kompaktere Wohnformen dominieren. Ein entscheidender methodischer Fortschritt der Arbeit ist die Erweiterung der Systemgrenze von LCA. Indem die Stoffströme für Infrastrukturen und Fahrzeugflotten sowie das Mobilitätsverhalten in Abhängigkeit von städtebaulichen Faktoren erstmals systematisch integriert werden, kann die Standortwahl selbst als bedeutender Treiber von Emissionen quantifiziert werden. Eine nachhaltige Stadtplanung kann nicht allein durch energieeffiziente Gebäude erreicht werden, sondern bei Planungsentscheidungen sind auch die mobilitätsinduzierten Effekte von Siedlungsstrukturen stärker zu berücksichtigen.

Die Dissertation „Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau – Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham“ (Heinrich 2019) befasste sich mit der Operationalisierung einer zirkulären Ökonomie im urbanen Bausektor. Ausgehend von einer Analyse der wichtigsten Materialflüsse im Bauwesen auf nationaler Ebene, wurde mit Stoffflussanalysen ein integrales, dynamisches Stoffstrommodell für den urbanen Wohnungsbau entwickelt, das sich durch die Kombination mehrerer methodischer Ansätze auszeichnet. Die Stoffflussanalyse auf nationaler Ebene basierte vorwiegend auf der umfangreichen Auswertung statistischer Daten, um den Status quo der Rohstoffverwendung, Recyclingpotenziale und Verwertungsraten zu bestimmen. Dabei wurde insbesondere zwischen mineralischen und metallischen Baustoffen unterschieden, deren Flussverhalten und Wiederverwertungsfähigkeit sehr unterschiedlich ausfällt.

Das Modell wurde durch die Anwendung auf das Fallbeispiel Freiham validiert. Hierfür wurde die stoffliche Zusammensetzung von ca. 2.400 Wohngebäuden analysiert. Zur detaillierten Erfassung der Stoffströme wurden GIS-gestützte Analysen sowie 3D-Stadtmodelle herangezogen, um geometrische Kennwerte von Gebäuden zu extrahieren. Diese wurden mit baustoffspezifischen Materialkennwerten (z. B. kg/m² BGF) verknüpft, um ein präzises Rohstoffkataster der bestehenden Wohngebäude zu erstellen. Für die Erhebung dieser Kennwerte wurden u.a. die typologische Baualtersklasseneinordnung der deutschen Wohngebäudetypologie des IWU (IWU 2015), die stofflich-energetischen Gebäudesteckbriefe des IOER Dresden (Gruhler et al. 2002) und Datensätze aus dem Altbauatlas (Klauß /Kirchhof 2010) herangezogen (Heinrich 2019:105 ff). Mit einer dynamischen Modellierung wurden Szenarien für Sanierung, Rückbau und Neubau über den Zeitraum bis 2050 berücksichtigt. Zur Bestimmung der Rückbaupotenziale und sekundären Rohstoffverfügbarkeit wurden Lebensdauermodelle für Gebäude und Bauteile eingesetzt. Basierend auf Verteilungsfunktionen und statistischen Daten zur Nutzungsdauer wurden zeitlich aufgelöste Prognosen erstellt, wann und in welchen Mengen bestimmte Materialien voraussichtlich frei werden. Die Ergebnisse flossen in Szenarienrechnungen zur Ermittlung des Selbstversorgungsgrads (SVG) für RC-Splitt und Metalle ein. Durch die Berücksichtigung von Marktwerten, Transportkosten und Recyclinginfrastrukturen wurden auch ökonomische Aspekte in der Betrachtung einer lokalen Verwertung einbezogen.

Als Ergebnis wurde in München-Freiham ein Gesamtbaustofflager von etwa 2,2 Millionen Tonnen identifiziert. Davon entfallen rund 48 % auf Beton und 24 % auf Mauersteine. Metalle machen ca. 5 % des Baustofflagers aus, wovon Stahl mit 92 % den dominanten Anteil hat. Der monetäre Wert allein der gebundenen Metalle beträgt über 20 Mio. Euro. Besonders auffällig war der hohe Kupferanteil in elektrischen Leitungen, der bei Mehrfamilienhäusern mit ca. 280 g/m² BGF angegeben wurde. Die modellgestützte Analyse zukünftiger Materialfreisetzungen zeigte, dass – je nach Lebensdauerannahmen – signifikante Mengen an Sekundärrohstoffen aus dem Bestand gewonnen werden können. Der Selbstversorgungsgrad für die Betonherstellung könnte bereits 2031 durch regional verfügbare Abbruchmassen als RC-Splitt gedeckt werden und eine vollständige Eigenversorgung mit Stahlschrott wäre ab etwa 2036 möglich. Die Studie zeigt, dass eine hochwertige, lokal orientierte Verwertung von Abbruchmaterialien maßgeblich zur Reduktion von Primärrohstoffbedarf und Transportaufwand und damit zur Senkung von CO₂-Emissionen und Kosten beitragen kann. Voraussetzung hierfür ist ein (kommunales) Stoffstrommanagement mit einer systematischen Verknüpfung von Stoff- und Raumdaten. Eine kontinuierlich gepflegte Datenbank zur Gebäudematerialität wäre ein entscheidender Schritt für die Entwicklung von übergreifenden Geschäftsmodellen zur Operationalisierung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen.

Die Dissertation „Grundlagen für die Planung von ressourcenminimalen urbanen Strukturen“ (Weidner 2020) thematisiert den zunehmenden Ressourcenverbrauch im urbanen Raum und welche Planungsparameter diesen beeinflussen, wie Bebauungstypologien und Dichten miteinander interagieren und welche Strukturen langfristig besonders effizient sind. Während der Energieverbrauch in der öffentlichen Debatte als Schlüsselthema der Nachhaltigkeit gilt, wird der Ressourcenverbrauch für Bau und Infrastruktur oft marginalisiert, obwohl der Bausektor etwa 50 % des globalen Ressourcenverbrauchs und 35 % der CO₂-Emissionen verursacht. Die Untersuchung geht von der Prämisse aus, dass mit wachsender Weltbevölkerung bis 2050 ca. 2,46 Mrd. Menschen zusätzlich in Städten leben werden und daher bei begrenzten Rohstoffen ressourcenschonender gebaut werden muss.

Das Ziel der Arbeit bestand daher darin, Grundlagen für die Planung ressourcenminimaler urbaner Strukturen zu identifizieren, zu quantifizieren und in ihrer Wirkung auf den Ressourcenverbrauch vergleichend darzustellen. Als methodischer Rahmen diente ein 1 km² großes Betrachtungsfeld, auf dem drei urbane Dichtegrade (400, 4.000 und 20.000 Einwohner/km²) durch fünf typisierte Bebauungsformen abgebildet wurden: Einfamilienhaus (EFH), 4-geschossiges und 6-geschossiges Mehrfamilienhaus (MFH), sowie 20- und 40-geschossige Hochhäuser. In Kombination miteinander entstehen insgesamt 15 Szenarien, die hinsichtlich

- (1) Ressourcenverbrauch von Gebäuden (Materialinput, Masse, Bauweise)
- (2) Ressourcenverbrauch von Verkehrsanlagen (Straßen, Wege)
- (3) Flächenverbrauch (Wohn-, Verkehrs- und Gesamtfläche)
- (4) Bauliche Dichte (Einwohner pro km²)
- (5) Gebäudetypologie (EFH, MFH, Hochhäuser) und
- (6) Bebauungsstruktur (Zeilen, Blöcke, Punkthochhäuser etc.)

analysiert wurden. Zur Datenerhebung und -verarbeitung wurden Literatursauswertungen, parametrische Modellierungen und Bilanzierungen der Materialverbräuche verwendet. Als besonders ressourcenrelevante Parameter haben sich in der Studie Gebäudehöhe, Bauweise, Wohnfläche pro Kopf sowie Erschließungs- und Verkehrsflächen erwiesen. Gebäudetechnische Anlagen wurden nicht betrachtet.

Zentrale Erkenntnis der Arbeit ist, dass eine Bebauung mit 6-geschossigen Mehrfamilienhäusern in nahezu allen Szenarien und Dichtestufen die geringsten Materialverbräuche pro m² Wohnfläche aufweist. Hochhäuser sind trotz geringer Flächenversiegelung weniger effizient, da ein höherer Materialaufwand für Tragstruktur und Technik zu einer schlechteren Nutzflächeneffizienz und so zu einer hohen Materialintensität pro Quadratmeter führen. Da der Ressourcenverbrauch der Verkehrsanlagen mit der Flächeninanspruchnahme und Erschließungslänge ansteigt, beanspruchen EFH-Siedlungen besonders viele Verkehrsflächen, was sich negativ auf den Gesamtressourcenverbrauch auswirkt. Insgesamt spielt aber der Ressourcenverbrauch für Infrastruktur im Vergleich zur Gebäudekonstruktion eine untergeordnete Rolle. Die Arbeit bietet ein modellhaftes Bewertungsinstrument für ressourcenspezifische Planungsentscheidungen. Die Systematik eignet sich als Planungsgrundlage für urbane Entwicklungen in Industrie- wie auch in Schwellenländern. Besonders unter dem Aspekt der globalen Urbanisierung bietet die Arbeit belastbare Hinweise zur Vermeidung ineffizienter Bautypologien.

2.7 Bilanzierungswerkzeuge zur Ermittlungen der Umweltwirkungen von Quartieren

Die seit Ende der 1990er Jahre zunehmende Verwendung von Ökobilanzen im Bauwesen wurde durch die Entwicklung von Bilanzierungswerkzeugen begleitet (im Weiteren auch als Tools bezeichnet). Im Vergleich zur Ökobilanz eines einzelnen Gebäudes ist die quartiersbezogene Ökobilanz komplexer. Der Erhebungsaufwand ist höher, da unterschiedliche Gebäudetypen, Baualtersklassen, Nutzungen und Infrastrukturelemente (Straßen, Plätze, Ver- und Entsorgung) berücksichtigt werden müssen, und es gibt Datenlücken, sodass häufig mit Durchschnittswerten und Typologien gearbeitet wird. In den letzten Jahren wurden sowohl in der Forschung als auch in der Praxis verschiedene Ansätze entwickelt, um quartiersbezogene Ökobilanzen zu ermöglichen. Da ein Ziel des Forschungsprojektes auch in der Entwicklung eines weiteren Tools zur Quartiersökobilanzierung lag, folgt hier ein kurzer Überblick zu bereits bestehenden Tools, die während der Forschungsarbeit recherchiert und ausgewertet wurden. Diese werden für unterschiedliche Zwecke wie Erstellung von Energiebilanzen und -berechnungen, Variantenvergleiche oder Wirtschaftlichkeitsanalysen eingesetzt, beinhalten aber nicht immer auch Lebenszyklusanalysen. Der Fokus der nachfolgenden Darstellung liegt auf Tools für die Quartiersebene, die zumeist im deutschsprachigen Raum entwickelt wurden, und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Einen ersten Überblick bietet die ExWoSt-Studie des BBSR „EQ II. Erweiterte Bilanzierung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen auf Quartiersebene“ (BBSR 2016), in der sieben Bilanzierungswerkzeuge dargestellt sind, die v. a. zur Vorplanung der Wärmeversorgung für Quartiere und Städte eingesetzt werden: EQ-Tool, District-ECA, GemEB, UrbanReNet, EFES, ECORegion und Klimaschutz-Planer.

Der Schwerpunkt dieser Werkzeuge liegt in einer automatisierten Erstellung von Energiebedarfen und Wärmelastprofilen auf der Basis von Gebäudedatenbanken und Stadtraumtypen, überwiegend ohne Einsatz von Lebenszyklusanalysen.

"EQ-Tool" wurde im Rahmen von Studien des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) (2011–2013 und 2015–2016) entwickelt, um eine konsistente, kommunal nutzbare Methodik zur energetischen Bilanzierung von Quartieren bereitzustellen. Es kombiniert top-down-Ansätze (statistische Verbrauchsdaten, Emissionsfaktoren) mit bottom-up-Ansätzen (Gebäudetypologien, Baualtersklassen, Nutzungsarten) und ermöglicht eine stufenweise Datenerfassung, von Minimalangaben bis hin zu detaillierten Verbrauchswerten. Bilanzierungen erfolgen getrennt nach Wohn-, kommunalen und sonstigen Nichtwohngebäuden sowie Verkehr und umfassen Endenergie, Primärenergie und CO₂-Emissionen. Das Tool ist kompatibel mit der Methodik der Bund-Länder-Klimaschutzbilanz, wodurch Quartiersergebnisse national konsistent sind. Eingesetzt wurde es u. a. in integrierten Quartierskonzepten im Rahmen der KfW-Programme „Energetische Stadtsanierung“, in Modellvorhaben wie „CO₂-freie Stadt“ sowie in der hessischen Initiative „100 Klimaschutzkommunen“. Ab 2017 wurde es weiterentwickelt, u. a. durch GIS-Anbindung, Aktualisierung der Gebäudetypologien, Integration neuer Emissionsfaktoren und Erweiterung mit zusätzlichen Nachhaltigkeitsindikatoren (Müller et al. 2023). Damit dient es als praxisnahes, wissenschaftlich fundiertes Instrument zur strategischen Planung energieeffizienter Quartierssanierungen, ist allerdings auf der Homepage des IWU nicht zum Download erhältlich. Weitere Informationen:

<https://www.iwu.de/forschung/gebaeudebestand/eq/>

Beschreibungen zu weiteren kostenlosen Berechnungstools des Instituts Wohnen und Umwelt sind auf dessen Homepage zu finden: <https://www.iwu.de/publikationen/tools/>

"District-ECA" (District Energy Concept Adviser / Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere) ist ein Planungstool, das ab 2008 im Rahmen der BMWi-Forschungsinitiative EnEff:Stadt und in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern des IEA ECBCS Annex 51 Energy Efficient Communities (2009–2012) unter Leitung des Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) initiiert und entwickelt und im Horizon 2020-Projekt MODER (2016–2019) weiterentwickelt wurde. Ziel war ein einfach nutzbare Software-Tool zu entwickeln, das von Energieplanern, kommunalen Entscheidern oder Wohnungsunternehmen für Entscheidungsprozesse in frühen Planungsphasen zur Entwicklung energieeffizienter Stadtquartiere eingesetzt werden kann. District-ECA basiert auf monatlichen Bilanzverfahren (angelehnt an DIN V 18599) und arbeitet mit Typgebäuden sowie vordefinierten Standardwerten. Dies ermöglicht die schnelle Abbildung eines Quartiers per Drag-&-Drop, in dem Gebäude mit bestimmter Nutzung, Größe, Baualtersklasse etc. gewählt und mit wenigen Eingaben an reale Gegebenheiten angepasst werden können (Erhorn-Kluttig et al. 2020). Für jedes Gebäude oder Gebäudecluster lässt sich die Effizienz von verschiedenen Varianten zu Hüllstandards und Anlagentechnik ermitteln und optimieren. Durch den Vergleich von Wärme-, Kälte- und Stromversorgungsszenarien mit dezentralen Versorgungslösungen (z. B. Einzelheizung, Wärmepumpen), zentralen Lösungen (z. B. Nahwärmenetz) oder Kombinationen miteinander können deren Kosten und die CO₂-Emissionen in der Betriebsphase ermittelt werden. Als Kennwerte werden Endenergiebedarf, Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen sowie der Anteil erneuerbarer Energien für das betrachtete Quartier berechnet.

Im Rahmen des EnStadt-Projekts STADTQUARTIER 2050 (2018 -2023) (vergl. Kapitel 2.5) wurde das Tool um ein Modul für die Ökobilanzierung erweitert (Katrin/Henzler 2024). Zur Integration der Analyse von Umweltaspekten galt es, „die verschiedenen Anwenderperspektiven, den Quartierskontext mit Neubau, Bestand und Sanierungsaktivitäten (sowohl für Gebäude und Energiekonzepte) sowie methodische Anforderungen der Ökobilanz durch geeignete Funktionalität, Datenaustausch und Schnittstellen umzusetzen“ (<https://www.stadtquartier2050.de/index.php/tools-22/oekobilanzmodul-fuer-district-eca-desktop>). Dieses Modul ermöglicht es jetzt, auch die Umweltwirkungen und graue Energie für Herstellungs-, Betriebs- und Entsorgungsphasen der Anlagentechnik zu ermitteln. Weitere Informationen: <https://www.district-eca.de/>

"EQ-City" – nicht zu verwechseln mit dem EQ-Tool vom IWU - ist ein vom Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE) entwickeltes, GIS-gestütztes Planungs- und Bewertungs-

werkzeug für klimafreundliche Wärmeversorgungskonzepte in Quartieren und Städten. Es wurde im Rahmen BMWK-geförderter Forschungsprojekte wie „E4Q – Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere“ und „UrbanGroundHeat“ konzipiert und dient primär der energetischen und wirtschaftlichen Vorplanung von Quartierswärmesystemen. Ziel ist die Unterstützung von Kommunen, Versorgern und Planungsbüros bei der strategischen Wärmewendeplanung auf lokaler Ebene. In dem Tool werden Geodaten und Gebäudetypologien mit standardisierten Bedarfsberechnungen (orientiert an DIN 18599) und Klimadaten verknüpft, um realistische Wärmebedarfsprofile zu erzeugen. Fehlende Eingangsdaten werden durch hinterlegte Standardwerte ergänzt. Auf der Angebotsseite greift EQ-City auf eine umfangreiche Anlagendatenbank für zentrale und dezentrale Technologien zurück (z. B. Wärmepumpen, KWK, Solarthermie, industrielle Abwärme). Die Netzintegration wird detailliert modelliert, inkl. Trassenoptimierung und Sektorkopplung. Die Berechnungen umfassen (1) Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar, erneuerbar), (2) CO₂-Emissionen aus der Betriebsphase der Versorgungssysteme, (3) Kosten (Investition, Betrieb) sowie (4) eine Nutzwertanalyse. Letztere dient der Bewertung und umfasst technische, ökonomische, ökologische sowie qualitative Kriterien (z. B. Akzeptanz, Komplexität). Benutzer des Tools können die Kriterien gewichten, um Prioritäten im Entscheidungsprozess abzubilden. Die Ergebnisse werden in Form von Szenariovergleichen, Ranglisten und automatisierten Berichten ausgegeben. Nach derzeitigem Stand ermöglicht EQ-City keine vollständigen Lebenszyklusanalysen nach ISO 14040/44. Weitere Informationen:

<https://www.iee.fraunhofer.de/de/anwendungsfelder/energiwirtschaft/quartier-stadt-region/eq-city.html>

Ein weiteres, derzeit viel verwendetes Tool für die Quartierswärmeplanung ist "nPRO". Das Planungswerkzeug wurde von der nPro energy GmbH in Kooperation mit dem Steinbeis-Innovationszentrum energieplus entwickelt. Die Entwicklung basiert auf Erfahrungen aus nationalen Förderinitiativen wie der Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) sowie aus Projekten zur kommunalen Wärmeplanung im Kontext der Wärmewende. Methodisch knüpft nPRO an etablierte Ansätze der integrierten Energiesystemmodellierung an und kombiniert GIS-basierte Gebäudedaten und automatisierte Wärmebedarfsberechnung zu technisch-ökonomischen Simulationen verschiedener Versorgungsszenarien. Neben der Grundfunktion zur Wärmebedarfsanalyse und Erzeugungsplanung enthält es Erweiterungen für CO₂-Bilanzierung, Einbindung erneuerbarer Energien, Speicher- und Netzintegration sowie Sektorkopplung. Die als cloudbasiertes Energiemanagementsystem konzipierte Plattform kann zur Dimensionierung und Simulation von Wärmenetzen eingesetzt werden, sowohl für konventionelle als auch für kalte Nahwärmenetze. Die erste Version wurde 2020 als webbasierte Plattform veröffentlicht und wird seitdem kontinuierlich weiterentwickelt, um geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen, neue Technologien und optimierte Berechnungsverfahren zu integrieren. Lebenszyklusanalysen sind bislang nicht implementiert. Weitere Informationen: <https://www.npro.energy/main/de/>

Auf Gebäudeebene gibt es neben den bereits langjährig etablierten Berechnungstools LEGEP (entwickelt von Holger König) oder dem vom BBSR betriebenen, webbasierten Tool eLCA, mit "DuboCalc" ein niederländisches Bilanzierungstool für nachhaltiges Bauen, das von Rijkswaterstaat (eine niederländische Behörde, die für die Planung, den Bau, die Verwaltung und die Instandhaltung der wichtigsten Infrastruktur des Landes zuständig ist) entwickelt wurde. Anders als das deutsche Ökobilanzierungstool eCLA des BBSR kann es für Hoch- und Infrastrukturbau angewandt werden (Püstow et al. 2023:11). Weitere Informationen: <https://www.dubocalc.nl/en/>

Eine Weiterentwicklung klassischer LCA-Tools stellt "CAALA" (Computer Aided Architectural Life-cycle Assessment) dar, das als digitales Planungstool zur Lebenszyklusanalyse, Energiebilanzierung und Kostenoptimierung von der CAALA GmbH entwickelt wurde. Die webbasierte Softwareplattform beruht auf einem BIM-gestützten, parametrischen Optimierungsworkflow mit dem Ziel, bereits in frühen Planungsphasen die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen verschiedener Entwurfsentscheidungen zu quantifizieren, um so nachhaltige Planungsentscheidungen zu unterstützen. Die angewandte Methode zur parametrischen Lebenszyklusoptimierung von Gebäuden in Echtzeit wurde von Alexander Hollberg im Rahmen einer Promotion entwickelt (Hollberg 2017) und die Plattform ist seit 2016 als kommerzielles Produkt nutzbar. Das Tool arbeitet normenkonform gemäß DIN V 18599 für die energetischen Bewertungsverfahren und nach ISO 14040/44, DIN EN 15978 mit Datensätze der ÖKOBAUDAT für die LCA (Version 2024, optional 2020/2016; für QNG-Nachweise zwingend

Version 2020) für die LCA. Für die Integration in die BIM-Workflows nutzt CAALA gbXML/IFC-Importe aus Revit, Archicad, Allplan, SketchUp und Rhino, inklusive einem automatisierten Material-Mapping zur ÖKOBAUDAT, was eine modellbasierte, konsistente Datenübernahme ohne manuelle Neuerfassung ermöglicht. In Echtzeit können so CO₂-Emissionen (kg/m²), Energiebedarf (kWh/m²) und Lebenszykluskosten (€/m²) berechnet werden.

Das Besondere an CAALA ist die parametrische Variantenanalyse, welche die Auswirkungen planerischer Entscheidungen wie Änderungen an Geometrie, Materialien oder Anlagentechnik unmittelbar in Echtzeit auf CO₂-Bilanz, Energiebedarf und Kosten abbildet und sich so zur Entscheidungsunterstützung für frühe Planungsphasen eignet, z.B. zur Analyse von Zielkonflikten zwischen ökologischen und ökonomischen Kriterien. CAALA nutzt kein klassisches Geoinformationssystem, es können aber GIS-Daten (z. B. CityGML, OpenStreetMap, ESRI-Shapefiles) zur Repräsentation städtischer Modelle genutzt werden, inklusive Kartenansicht, Gebäudeauswahl via Klick, Attributbearbeitung und geografischer Visualisierung. So lassen sich auch größere Gebäudebestände als Quartiersbilanzen erfassen. Damit zeigt CAALA auf, wie eine Implementierung von Funktionalitäten zur Quartiersbilanzierung möglich ist. Für die Nutzung der Plattform werden relativ hohe Lizenzgebühren verlangt, was eine Einschränkung gegenüber den anderen, meist kostenlos nutzbaren Werkzeugen darstellt.

Weitere Informationen: <https://www.caala.de/>

Weitere relevante Tools mit Quartiersbezug finden sich in Österreich. Beim "MORECO Siedlungsrechner" handelt es sich um ein Planungstool zur Abschätzung mobilitätsbezogener Folgekosten im Wohnungsbau, das aus dem länderübergreifenden EU-Programm "Europäische Territoriale Zusammenarbeit 2007-2013 Alpenraum" kofinanziert wurde. Das Tool fokussierte sich auf den GWP und berechnete über die Entfernungen zu wichtigen Zielen, den Mobilitätsaufwand in Jahreskilometern, sowie die CO₂-Emissionen für einen statistisch durchschnittlichen Haushalt (Schnürch et al. 2014).

Weitere Informationen: <http://www.moreco.at/siedlungsrechner/>

"Zersiedelt" bzw. der "Graue-Energie-Rechner" ist ein Web-basiertes Tool, das von einem mehrköpfigen Konsortium entwickelt und vom IT-Unternehmen akaryon umgesetzt wurde. Das Tool stellt eine integrierte Bewertung der grauen Energie für die Errichtung von Gebäuden und deren Erschließungsinfrastruktur zur Verfügung. Es bezieht Daten aus der Datenbank ecoinvent und betrachtet vordergründig den Primärenergiebedarf (ZERsiedelt 2014). Weitere Informationen: <https://www.zersiedelt.at/>

Weiterhin ist auf das laufende Forschungsprojekt „Lebenszyklus-Bilanzierung in frühen Bauplanungsphasen zur Analyse von Umweltauswirkungen (LezBAU)“ zu verweisen, das als EnOB-Forschungsverbund unter Leitung des IWU Darmstadt mit Laufzeit von 2023 bis 2025 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) bzw. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird. Projektziel ist die Entwicklung eines kostenlosen, web-basierten Tools, das mit minimalen Eingaben eine schnelle Abschätzung der Lebenszyklusemissionen von Gebäuden ermöglichen soll. Insbesondere kleinere Bauvorhaben im Neubau wie in der Sanierung sollen von diesem praxisnahen Werkzeug profitieren, da diesen eine Nutzung kommerzieller LCA-Software oft zu aufwendig oder zu teuer ist. Das Tool nutzt einen Katalog von Beispielgebäuden mit vordefinierten Konstruktionen und Anlagentechniken, die als Standard hinterlegt sind, um eine pauschale Abschätzung der grauen Emissionen und Optimierungspotenziale vornehmen zu können. Ein wichtiger Aspekt für die Tool-Entwicklung ist dessen Benutzerfreundlichkeit und Datensicherheit. Die Web-Anwendung soll nur wenige Eingaben erfordern und den Anwendern schrittweise Zwischenergebnisse liefern. Nach Abschluss einer Berechnung verbleiben keine Projektdaten auf den Servern des LezBAU-Projekts, wodurch Datenschutz gewährleistet wird. Trotz der Vereinfachung soll das Tool hinreichend wissenschaftlich fundierte Ergebnisse liefern.

Weitere Informationen: <https://www.iwu.de/forschung/energie/lezbau/> und <https://www.lezbau.de/>

In aktuellen wissenschaftlichen Arbeiten (Yoon 2025:34f., Steinort 2025) fanden sich noch weitere Hinweise zu Tools wie TEASER, SimStadt, ECORegion oder Open eQuarter (Nytsch-Geusen et al. 2016), die aber nicht mehr im Forschungsprozess berücksichtigt werden konnten. Seit Januar 2025 gibt es auf der Homepage "Gebäude-

forum Klimaneutral“ der Deutschen Energieagentur (dena) ebenfalls weitere Informationen zu Bilanzierungstools, wie Open Plan, TRNSYS Transsolar, EHDO, Quartiersgenerator und E4Q_Quartierbewertungstool IWU (Müller/Koert 2022) (Stand Mai 2025). Weitere Informationen:

<https://www.gebaeudeforum.de/wissen/quartiere/lebenszyklusbetrachtung/bilanzierungstools/>

2.8 Zusammenfassung und weitere Forschungserfordernisse

Der Überblick zum Stand der Forschung eines nachhaltigen Ressourcenmanagements in urbanen Systemen und deren Bilanzierungsmethoden zeigt eine heterogene Landschaft. Es existiert eine Vielzahl an Modellen und Bilanzierungsmethoden, die unterschiedliche Funktionalitäten aufweisen und sich in den betrachteten Parametern, Systemgrenzen, Lebenszyklusphasen, Wirkkategorien, Untersuchungszielen und Datenanforderungen unterscheiden. Viele Modelle sind auf Projekt- oder Quartiersebene angelegt, verknüpfen ökologische, technische und planerische Perspektiven und zeigen zentrale Zusammenhänge zwischen Ressourceneinsatz, Siedlungs- und Infrastrukturen auf, die teilweise auch über die im Forschungsprojekt untersuchten Fragen hinausgehen.

Aktuelle Forschungsdesiderate liegen in der Weiterentwicklung von Methoden und Tools für dynamische und parametrische LCA. Dynamische Lebenszyklusanalyse (DLCA) erweitert die klassische (statische) LCA, indem sie Veränderungen in den Rahmenbedingungen bei der Ökobilanzierung eines Gebäudes über dessen Lebensdauer berücksichtigen und Emissionen nicht nur mengenmäßig, sondern auch in ihrer zeitlichen Verteilung bewerten. Dadurch werden Entwicklungen wie ein fortschreitender Ausbau erneuerbarer Energien im Strommix, technologischer Fortschritt oder verändertes Nutzungsverhalten in die Ökobilanz einbezogen. DLCA ist in den letzten Jahren zu einem eigenständigen Forschungsschwerpunkt geworden (Su et al. 2017). Einen Überblick zu methodischen Ansätzen geben systematische Reviews (Slavković/Stephan 2024, Salati et al. 2025).

Parametrische LCA (PLCA) ist ein Ansatz zur Durchführung von Lebenszyklusanalysen, bei dem wichtige Einflussfaktoren (Parameter) wie Materialeigenschaften, Bauteilgeometrien oder Nutzungsbedingungen variabel und effizient definiert und systematisch verändert werden können. Forschungsarbeiten wie „Integrierte Lebenszyklusoptimierung (ILCO)“ (Donath et al. 2018) sowie (Hollberg 2017) liefern methodische Grundlagen zur systematischen Variantenexploration in der Architektur mit dem Ziel, die für die Lebenszyklusperformance relevanten Energie- und Stoffströme auf Gebäude- und Quartiersebene frühzeitig in Planungsprozesse zu integrieren und damit CO₂-Emissionen und Ressourcenverbrauch zu minimieren (Gengnagel/Apelániz 2023).

Die bestehenden Modelle und Tools unterscheiden sich stark hinsichtlich der adressierten Zielgruppen, wie Architekten, Energieplaner, Kommunen oder Forschende, sowie in der erforderlichen Expertise, um das jeweilige Tool zu bedienen. Allerdings besteht ein geringer Fokus auf eine ganzheitliche Bilanzierung realer Siedlungen und es fehlen mehrskalige Modellarchitekturen, die Mikro- (Gebäude), Meso- (Quartier) und Makroebene (Region) methodisch konsistent verbinden, um Planungsentscheidungen auf Siedlungsebene präzise zu unterstützen. Infrastrukturen werden zwar partiell bewertet, es fehlen aber standardisierte, belastbare Datengrundlagen für Infrastrukturkomponenten in nationalen und internationalen Datenbanken. Infrastrukturbewertung erfolgt zumeist sektoral getrennt (Energie, Wasser, Verkehr), wodurch Synergien und Wechselwirkungen zwischen den Systemen (z. B. gemeinsame Trassenführung, Flächenverbrauch) nicht erfasst werden. Eine integrierte sektorübergreifende Quartiersbilanzierung (Gebäude + Energieversorgung + Infrastruktur) ist bisher methodisch kaum etabliert, eine ökologische Gesamtbewertung von Siedlungen ist aber ohne Berücksichtigung der technischen Infrastruktur unvollständig. Die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebäudeforum Klimaneutral der DENA deuten darauf hin, dass ein wachsendes Interesse an standardisierten Quartierstools besteht, die Energie-, Emissions- und Wirtschaftlichkeitsanalysen kombinieren. Die Zukunft liegt in modularen, interoperablen Toolketten, die Gebäude-, Mobilitäts- und Infrastrukturdaten koppeln.

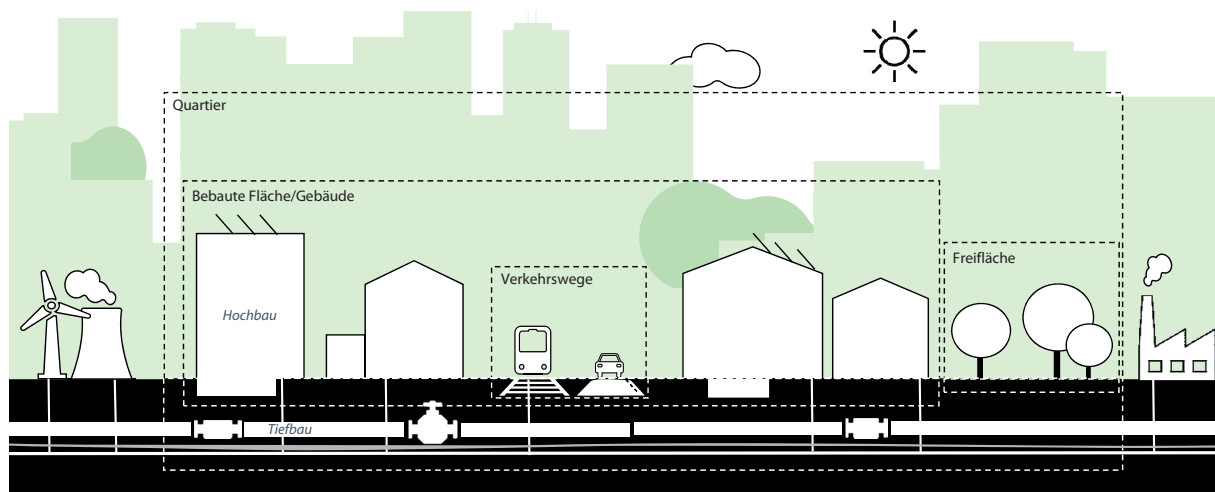
3. Forschungsdesign

3.1 Arbeitshypothesen

Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus – von der Erstellung baulicher Anlagen inklusive der vorgelagerten Herstellungsprozesse und Lieferketten, über die Nutzungsphase und Instandhaltung bis hin zum Abriss und Recycling – weisen verschiedene Siedlungsstrukturen unterschiedlich hohe Energieverbräuche und CO₂-Emissionen auf. Anlagen der städtischen Infrastruktur wie Straßen, Versorgungsleitungen oder Einrichtungen für den ruhenden Verkehr werden in Ökobilanzen typischerweise nicht mit bilanziert (Alaux et al. 2024). Der Fokus auf den Hochbau kann zur Folge haben, dass andere Umweltauswirkungen, welche beispielsweise auf eine bestimmte Bebauungsdichte oder gemeinschaftlich genutzte Infrastrukturelemente zurückzuführen sind, übersehen bzw. unzureichend eingeschätzt wurden (Bußwald et al. 2019; Schiller 2004).

Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Forschung untersucht, ob die technische und verkehrliche Infrastruktur relevante Beiträge zum GWP einer Neubausiedlung beitragen, welchen Einfluss die räumlichen Ausprägungen von Siedlungsstrukturen darauf haben und wo gegebenenfalls Optimierungspotenziale liegen. Eine Eingrenzung der untersuchten räumlich-baulichen Teilsysteme zeigt die Abbildung 4.

Abbildung 4:
Systemgrenzen und Teilsysteme für die Erstellung einer Quartiersökobilanz



3.2 Forschungsfragen

Die zentrale Forschungsfrage lautete: Welche Energiebedarfe, Treibhausgaspotenziale und andere ökologische Auswirkungen haben unterschiedliche Siedlungstypen über ihren Lebenszyklus unter Berücksichtigung der Prozessketten sämtlicher Hoch-, Tiefbau- und Infrastrukturmaßnahmen bei neuen Quartiersentwicklungen?

Zur Beantwortung dieser Frage wurde das betrachtete Gesamtsystem in Teilsysteme untergliedert und hinsichtlich weiterer Fragenkomplexe untersucht:

1. Welche städtebaulichen und architektonischen Strukturmerkmale sind für die Siedlungsentwicklungen der vergangenen Jahre typisch?
2. Wie wirkt sich die Wahl der Siedlungsstruktur auf das Gesamt-GWP einer Siedlung im Verhältnis zu anderen Entscheidungen wie beispielsweise der Standortwahl, der Wahl des Energieträgers oder der Gebäudequalität aus?

3. Welcher GWP-Anteil entfällt auf die verschiedenen Teilsysteme wie Gebäude, Infrastrukturen und Energiesysteme sowie die Betriebsenergie in Abhängigkeit verschiedener Energiestandards, Wärmeversorgungssystemen und Konstruktionsweisen an der Gesamtbilanz verschiedener Siedlungstypen?
4. Was sind geeignete räumliche und zeitliche Systemgrenzen, um die zentrale Forschungsfrage zu beantworten und wie beeinflussen die gewählten Systemgrenzen und andere Vorannahmen die Bilanzierungsergebnisse?
5. Welche Erkenntnisse lassen sich im Kontext des umweltpolitischen Ziels einer ab 2045 CO₂-neutralen Gesellschaft in Deutschland und der damit verbundenen Dynamik der Dekarbonisierung des Energiesystems durch eine zeitlich aufgelöste Darstellung der Bilanzierungsergebnisse gewinnen? Sind graue Energie und GWP auch zukünftig noch aussagekräftige Umweltindikatoren oder müssten andere Indikatoren Berücksichtigung finden?
6. Zu welchem Zeitpunkt und auf welche Weise können die Untersuchungsergebnisse in zukünftige Planungen von Neubauquartieren am effektivsten einfließen? Welche Steuerungsinstrumente sind für kommunale Entscheidungsträger erforderlich und geeignet?

3.3 Methodischer Ansatz

3.3.1 Methodologische Einordnung des Forschungsprojekts

Die Ermittlung der Umweltwirkungen von Siedlungen oder Quartieren ist eine komplexe Aufgabe, für die bereits verschiedene Modelle und Methoden entwickelt wurden (siehe Kapitel 2). Die Erstellung einer Ökobilanz ist – ähnlich wie auch andere Methoden der Umweltbewertung – nach folgenden vier Phasen gegliedert (vergl. auch Kapitel 6.1):

1. Definition der Untersuchungsziele mit Festlegung der zu betrachtenden Systemelemente sowie der funktionalen, räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen,
2. Erstellung einer Sachbilanz (Bestands- und Flussgrößen eines Systems),
3. Erstellung einer Wirkungsbilanz (Umweltwirkungen der in der Sachbilanz quantitativ bewerteten Systemelemente) und
4. Interpretation der Ergebnisse.

Die Arbeitsprozesse innerhalb dieser vier Phasen erfolgten nicht streng linear. Da mit der Erhebung von Sach- und Wirkungsbilanzen ein wachsender Erkenntnisgewinn und besseres Systemverständnis verbunden war, wurden die Untersuchungsziele und Systemgrenzen, so erforderlich, angepasst. Dieses hochgradig iterative Vorgehen war in der Forschungspraxis mit einem interdisziplinären Arbeitsprozess verbunden. Arbeitsschwerpunkte der LUH lagen auf der Entwicklung einer Siedlungstypologie und auf der Erstellung eines Mengengerüsts. Arbeitsschwerpunkte der FHP lagen in der Entwicklung des Bilanzierungsmodells und in der Berechnung der Siedlungsökobilanz.

Ein wesentlicher methodischer Beitrag dieser Untersuchung liegt in der Zusammenführung von Siedlungstypologien und Ökobilanzierung. Ziel einer Ökobilanz ist, eine kontrollierte und überprüfbare Vergleichbarkeit der untersuchten Forschungsgegenstände zu gewährleisten. Mit der Festlegung auf die Verwendung der Methode der Ökobilanzierung sind Vor- und Nachteile verbunden. Die Vorteile der Methode liegen u. a. darin, dass es sich um ein international standardisiertes Verfahren handelt (siehe auch Kapitel 6.1), mit dem im Bau-

wesen bereits seit über 40 Jahren Bilanzen erhoben werden. Es besteht daher eine große Menge an Ergebnissen (Benchmarking) und Anschlussfähigkeit und Vergleichbarkeit mit anderen LCA-Studien im Gebäudebereich sowie etablierte Verfahren zur Sicherung der Datenqualität bei der Erhebung der Umweltauswirkungen von Baumaterialien, die durch generische oder spezifische Datenbanken wie ÖKOBAUDAT, Ecoinvent oder GaBi gewährleistet sind.

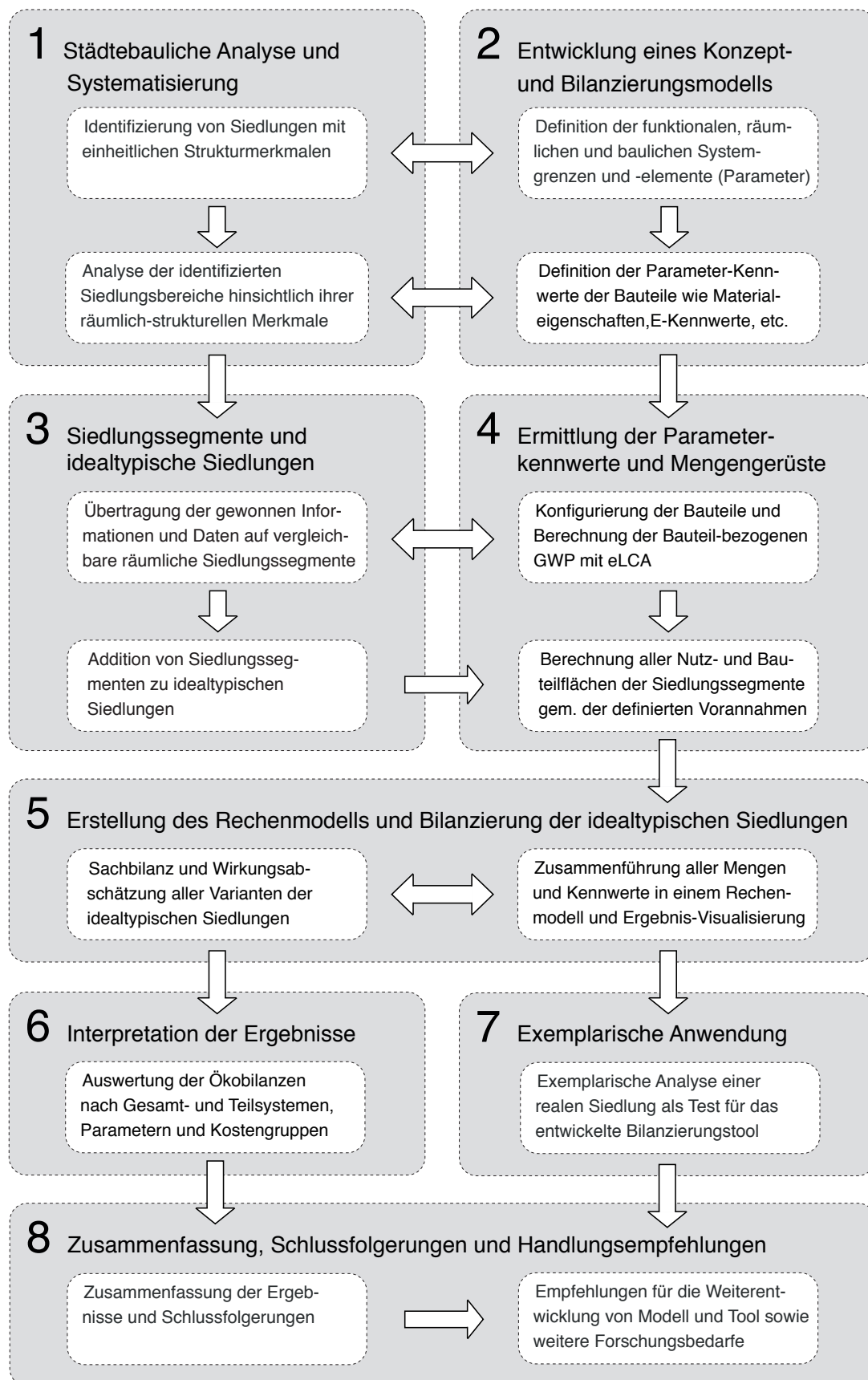
Hier liegen aber auch die Grenzen der Methode, da für jede Ökobilanz eine Vielzahl an funktionalen, technischen, räumlichen und zeitlichen Vorannahmen zu treffen sind, welche die Bilanzergebnisse stark beeinflussen (siehe Kapitel 3.3.3).

3.3.2 Vorgehensweise und Methoden

Im Folgenden sind die Arbeitsschritte beschrieben, die im Rahmen der Forschung durchgeführt wurden, um den Siedlungsbau in Deutschland zu erheben, diesen zu typisieren, eine Methodik zur Ökobilanzierung von Siedlungen zu entwickeln und diese durchzuführen. Das Vorgehen ist hier in acht Arbeitsschritten dargestellt, die nachfolgend eingehend erläutert sind (siehe auch Abbildung 5):

1. Städtebauliche Analyse und Systematisierung des Siedlungsgeschehens in Deutschland im Zeitraum von 2010 bis 2020
2. Entwicklung eines Konzept- und Bilanzierungsmodells
3. Entwicklung von Siedlungssegmenten und idealtypischen Siedlungen als Grundlage zur Erhebung der Mengengerüste
4. Ermittlung der Parameter-Kennwerte und der Mengengerüste
5. Erstellung eines Rechenmodells und Ermittlung der Ökobilanzen der idealtypischen Siedlungen mit Visualisierung der Ergebnisse
6. Auswertung, Interpretation und Bewertung der Ökobilanzergebnisse
7. Exemplarische Anwendung des Ermittlungsverfahrens auf reale Siedlungen
8. Zusammenfassung der Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Abbildung 5:
Übersicht zur Vorgehensweise und der Arbeitsschritte



(1) Städtebauliche Analyse und Systematisierung des Siedlungsgeschehens in Deutschland im Zeitraum von 2010 bis 2020

Zunächst wurde eine empirische Datenerhebung und Analyse von Siedlungen durchgeführt, die zwischen 2010 und 2020 im gesamten Bundesgebiet gebaut wurden. Durch die statistische Datenanalyse und eine ergänzende Literaturlauswertung wurden wiederkehrende Standardformen und Geometrien von neu errichteten Siedlungsstrukturen bestimmt. Die Auswahl der zu bilanzierenden Siedlungstypen stützt sich auf empirische Verfahren zur Klassifikation aus der qualitativen Sozialforschung (Keller/Kluge 2010; Sodeur 1974) und auf Methoden der städtebaulichen Strukturanalyse, die in der Planungspraxis (Reicher 2012), in der Stadtforschung (z.B. Misselwitz/Rieniets 2006) sowie in der Vermittlung (Rieniets/Rosenberger 2019) verwendet werden. Darauf aufbauend wurde ein eigenes Verfahren zur Ermittlung und Klassifizierung typischer Strukturmerkmale im Siedlungsbau entwickelt. Das detaillierte Vorgehen ist in Kapitel 4 beschrieben.

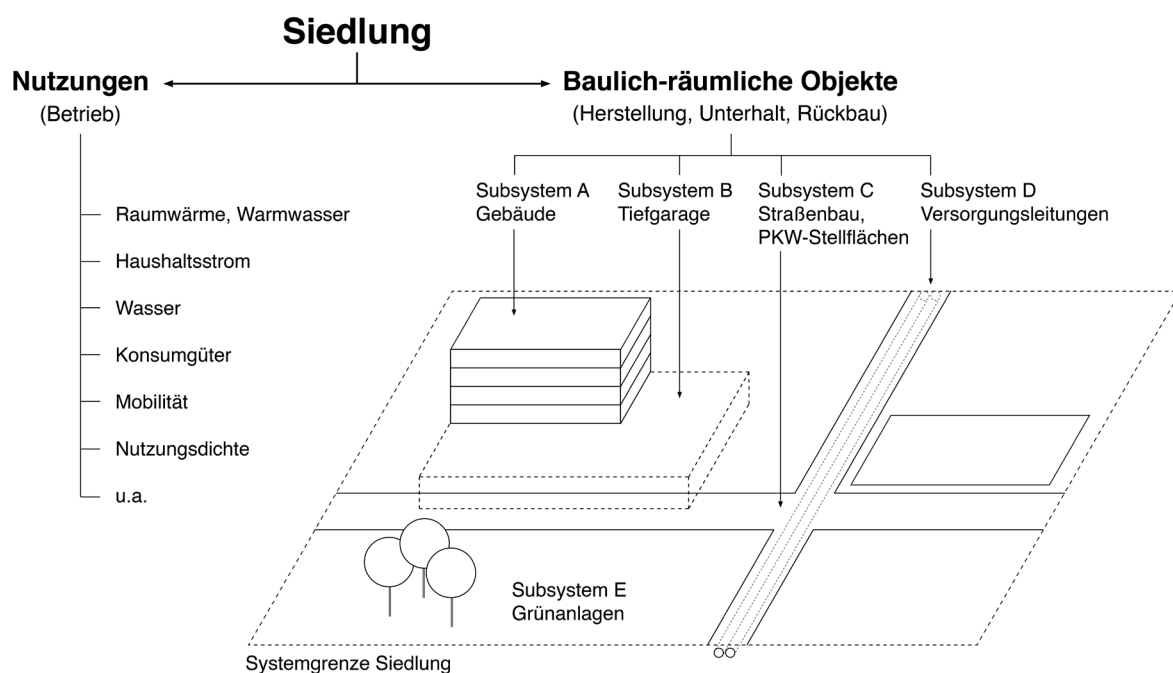
(2) Entwicklung eines Konzept- und Bilanzierungsmodells

Für die Bilanzierung der ökologischen Auswirkungen einer Siedlung war zu definieren, welche Systemelemente und Systemgrenzen (Teilsysteme) für die Bilanzierung relevant sind und hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen bewertet werden können. Das Ergebnis ist zunächst ein Konzeptmodell, in dem die großen Teilsysteme einer Siedlung in ihren räumlichen, baulichen und funktionalen Systemgrenzen und Ausprägungen unterschieden werden (Abbildung 6).

Aufbauend auf dem Konzeptmodell galt es, in wechselseitiger Abstimmung mit der Erhebung der Siedlungsmerkmale, die Teilsysteme durch geeignete Parameter zu spezifizieren, deren wechselseitige Beziehungen zu ermitteln und in einem Bilanzierungsmodell abzubilden. Durch Literaturanalysen, Experteninterviews und in Abwägung der Relevanz wurden die sechs wichtigsten Siedlungs- und Gebäudeparameter für die Untersuchung definiert (siehe Abbildung 7). Für diese Parameter wurden hinsichtlich ihrer untersuchten Eigenschaften Unterkategorien gebildet, und in morphologischen (Gebäude- und Erschließungstyp, Dichte) sowie bau- oder energietechnischen Varianten (Bauweise, Energiekennwert, Wärmeversorgung) untersucht.

Abbildung 6:

Konzeptmodell zur Unterscheidung der Teilsysteme einer Siedlung mit ihren funktionalen, räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen

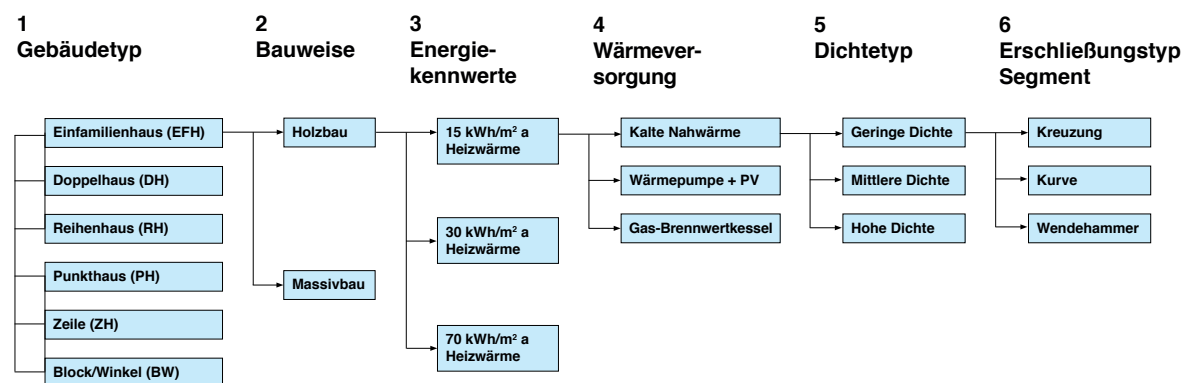


Jeder dieser Parameter ist durch eine Vielzahl weiterer untergeordneter Eigenschaften charakterisiert, die es angemessen zu beschreiben galt. Funktionale Aspekte wie Pro-Kopf-Wohnflächennutzung, durchschnittliche Belegungsdichte der Wohneinheiten oder Stellplatzschlüssel wurden bei der Bemessung der Parameter berücksichtigt.

Diese Parameter sind in allen untersuchten Siedlungstypen vorhanden, weisen aber verschiedene Ausprägungen auf. Für die Erstellung der Sachbilanz müssen sich alle physischen Auswirkungen dieser Siedlungsbestandteile redundanzfrei den Teilsystemen zuordnen lassen. Die Auswahl dieser Systemparameter bildet die Grundlage für die Entwicklung eines Bilanzierungsmodells. Als zentrale Wirkungskategorie der Ökobilanzierung wurde das Treibhausgaspotenzial oder Erderwärmungspotenzial (THG bzw. Global Warming Potential, GWP) gewählt, es stellt eine der geläufigsten Wirkungskategorien im Baubereich dar und ist daher auch in dieser Studie der Fokus (Dollhopf 2021). Weitere Wirkungskategorien sind aber mit erhoben worden und könnten ebenfalls ausgewertet werden

Abbildung 7:

Zentrale Parameter des Bilanzierungsmodell mit den Unterkategorien der untersuchten Spezifikationen



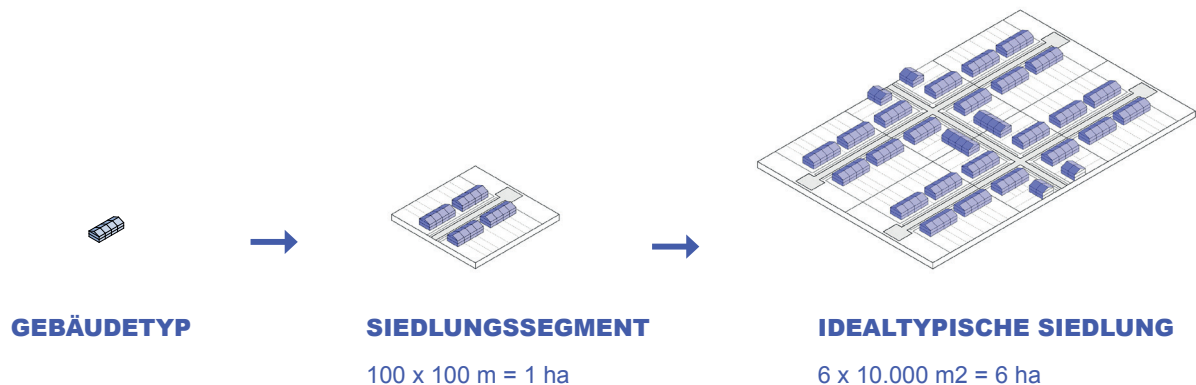
(3) Entwicklung von Siedlungssegmenten und idealtypischer Siedlungen als Grundlage zur Erhebung der Mengengerüste

Die Mengenerhebung der eingesetzten Energie- und Stoffströme erfolgte in einem mehrstufigen Verfahren. Als wichtige Randbedingung war zu berücksichtigen, dass diese auf hinreichend vergleichbaren funktionalen, räumlichen und baulichen Bezugsgrößen beruht. Nahezu jede gebaute Wohnsiedlung ist durch eine Mischung und Varianz an Gebäudetypen und deren Materialität, Erschließungstypen oder Infrastrukturelementen charakterisiert. Eine differenzierte Bilanzierung würde zwar jeweils präzise Daten zur untersuchten Siedlung liefern, die Gesamtökobilanz würde aber einen wenig erkenntnisreichen Durchschnittswert ergeben. Zudem wäre dieses Vorgehen sehr zeitaufwendig - insbesondere bei komplexen Gebäudegeometrien (z.B. aufgrund winkliger Grundstückszuschnitte und daraus resultierender städtebaulicher Figuren) -, ohne dass das einen wesentlichen Einfluss auf die Ökobilanz haben würde.

Daher wurde ein Verfahren entwickelt, das die typischen Ausprägungen (z.B. Flächengrößen und Materialvarianten bei der Ausführung) von Siedlungselementen und realen Siedlungen erfasst und auf eine städtebauliche Basiseinheit mit einer Größe von 1 ha (100 m x 100 m) überträgt, die im Weiteren als Siedlungssegment bezeichnet wird. Ein Siedlungssegment ist durch drei unterschiedliche städtebauliche Strukturmerkmale charakterisiert, aus deren systematischen Kombination - sechs Gebäudetypen, drei Erschließungsformen und drei Dichtetypen - sich insgesamt 54 Siedlungssegmente darstellen lassen. Diese dienen als räumliche Bezugsgröße zur Ermittlung der geometrischen Kenndaten für die Ökobilanzierung, in der alle Ausprägungen der untersuchten Parameter systematisch variiert wurden. Hieraus wurden anschließend sogenannte idealtypische Siedlungen mit einer Größe von 6 ha konfiguriert (Abbildung 8). Das detaillierte Vorgehen ist in Kapitel 5 beschrieben.

Abbildung 8:

Erstellung vergleichbarer Bilanzierungseinheiten durch die Entwicklung von Siedlungssegmenten und idealtypischen Siedlungen



Durch die Kombination der Siedlungssegmente zu diesen idealtypischen Siedlungen war es möglich, den jeweiligen Anteil der Siedlungsinfrastruktur, wie Straßen, Gehwege, Grundleitungen etc., im Verhältnis zu den Gebäuden unter vergleich- und kontrollierbaren Bedingungen zu ermitteln.

Im Modell lassen sich alle Elemente einer Siedlung drei räumlichen Ebenen zuordnen:

- Bauliche Elemente (z.B. alle Wohngebäude), die sich oberhalb der Erdoberfläche befinden und dem Hochbau zugeordnet werden,
- Bauliche Elemente wie Straßen, Wegen, Plätze und Grünflächen, die sich auf der Erdoberfläche befinden, aber dem Tiefbau zugeordnet werden sowie
- Versorgungsleitungen und andere Konstruktionen des Tiefbaus, die unter der Erdoberfläche liegen.

Die drei Ebenen stehen in unterschiedlichen Abhängigkeiten zueinander. So beeinflusst der Gebäudetyp und dessen städtebauliche Anordnung die Form und die Dimensionierung der Erschließung. Von der Wegeführung hängt wiederum der Verlauf der Versorgungsinfrastrukturen ab, die in der Regel unterhalb der Straßendecke verlegt werden.

(4) Ermittlung der Parameter-Kennwerte und der Mengengerüste

Im Weiteren waren die jeweiligen Parameter näher zu spezifizieren und die über ihren Lebenszyklus hinweg induzierte Menge an Energie- und Stoffströmen sowie die damit verursachten Umweltwirkungen (hier GWP) zu ermitteln. Grundlagen zur Methodik der Lebenszyklusanalyse und den Konventionen zur Beschreibung der Lebenszyklusphasen sind in Kapitel 6.1 näher ausgeführt. Die GWP-Berechnung für eine Siedlung lässt sich vereinfacht in folgender Formel ausdrücken:

$$(\text{Summe}) \text{ GWP Quartier} = (\text{Summe}) \text{ Herstellungsaufwand (1-n)} + (\text{Summe}) \text{ Betriebsaufwand (1-n)}$$

Der Herstellungsaufwand umfasst alle Maßnahmen zur Erstellung von Gebäuden und Infrastrukturanlagen über deren Lebenszyklus, d.h. die physische Herstellung der Materialien, die Erstellung, den Unterhalt sowie die Reparaturen oder den Ersatz und die Entsorgung aller Strukturen. Diese Prozesse lassen sich vereinfacht über folgende Formel ausdrücken:

$$(\text{Summe}) \text{ GWP Herstellung} = (\text{Summe}) \text{ Materialmenge (1-n)} \cdot \text{GWP /Material-Einheit (1-n)}$$

GWP/Material-Einheit bezeichnet das GWP, das für die Herstellungs- und Transportprozesse der jeweils ver-

wendeten Materialien über ihren gesamten Lebenszyklus anfällt, z. B. 1 cbm Beton, Holz, Dämmstoff etc, in m², m³, kg etc.. Die Kennwerte werden in Ökobilanzdatenbanken bereitgestellt. Die rechnerisch angenommene Nutzungsdauer im Bauwesen beträgt üblicherweise 50 Jahre, Aufwendungen für Unterhalt und ggf. Erneuerung bei kürzerer Lebensdauer werden eingerechnet.

Der Betriebsaufwand umfasst alle kontinuierlich anfallenden Energieaufwendungen zur Erzeugung von Raumwärme, Warmwasser, zur Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden mit allen erforderlichen Energieträgern und Hilfsenergien. Der Herstellungsaufwand zur Erzeugung dieser Systeme ist im Herstellungsprozess berücksichtigt. In der Praxis ist der Betriebsaufwand stark von den Lebensstilen und dem Nutzerverhalten der Bewohner abhängig, für die Berechnungen können aber plausible Durchschnittswerte angenommen werden.

Für die Ermittlung der Umweltwirkungen wurde mit eLCA gearbeitet. eLCA ist ein kostenloses und frei zugängliches Ökobilanzierungstool, das vom BBSR entwickelt wurde und unterhalten wird. In dem Tool können von einem zu bilanzierenden Objekt die Mengengerüste eingegeben und mit Daten zu den Umweltwirkungen der jeweils verwendeten Materialien der Konstruktionselemente verknüpft werden. Diese Daten werden aus der ÖKOBAUDAT bereitgestellt und stetig aktualisiert und ergänzt. Der kostenfreie Zugang ist ein großer Vorteil zur allgemeinen Nutzung von Ökobilanzierungen, hat aber auch einen begrenzten Umfang an vorhandenen Materialdaten und technischen Systemen. Für alle konstruktiven Parameter wurden in eLCA die Bauteile für Fassade, Dächer, Decken, Innenbauteile etc. in Abhängigkeit der konstruktiven oder energietechnischen Anforderungen differenziert konfiguriert, und der GWP-Kennwert für die jeweils passende Einheitsmenge (1 m², 1 lfm etc.) berechnet.

Für die Modellentwicklung sowie Validierung und Qualitätssicherung der verwendeten Daten der einzelnen Parameter wurden projektbegleitend Interviews mit verschiedenen Expertinnen und Experten geführt, die in Kapitel 10 genannt sind. Die detaillierten Angaben für die Vorannahmen und deren Ermittlungsverfahren sind in Kapitel 6 sowie im Anhang ausgeführt.

(5) Erstellung eines Rechenmodells und Ermittlung der Ökobilanzen der idealtypischen Siedlungen

Nachdem die Erfassung aller relevanten Siedlungsmerkmale und deren Wechselwirkungen abgeschlossen war, bestand der nächste Schritt darin, diese Parameter in einem Rechenmodell mit einem validen Mengengerüst mathematisch zu verknüpfen, um zunächst das Gesamt-GWP der idealtypischen Siedlungen zu berechnen, woraus Flächen- und Person-bezogene Kennwerte (Indikatoren) abgeleitet wurden.

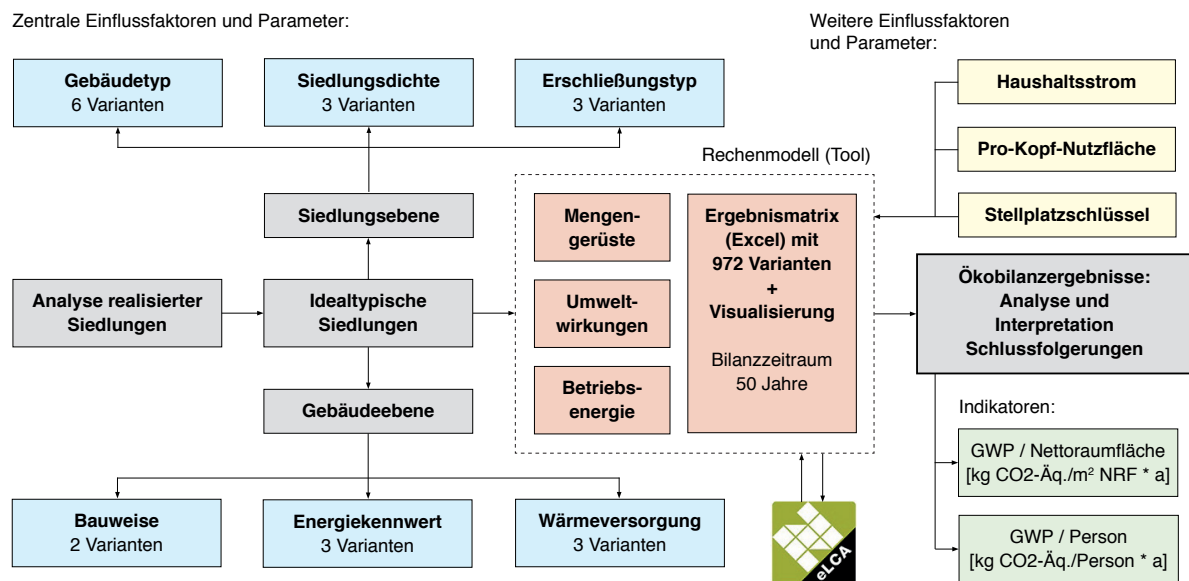
Für jeden der sechs definierten Hauptparameter ergibt sich eine auf die Siedlungssegmente und idealtypischen Siedlungen bezogene Flächen- und Massenbilanz, die mit den GWP-Kennwerten der jeweiligen Bauteile bzw. Systemelemente multipliziert wurden. Ergänzend dazu wurden die Parameter, welche nicht oder nur teilweise durch die Geometrie oder Materialität der Gebäude beeinflusst sind - Energiekennwert und Wärmeversorgungssystem -, zur Berechnung der Betriebsenergie der Gebäude verwendet. Die daraus resultierenden GWP-Werte wurden ebenfalls auf Siedlungsebene skaliert.

Aus der Kombination der 54 Siedlungssegmente mit zwei Konstruktionsweisen (Holz und Massivbau), drei Energiekennwerten (15, 30 und 70 kWh) und drei verschiedenen Wärmeversorgungssystemen (Luftwärmepumpe, Kalte Nahwärme und Erdgas) ergeben sich 972 mögliche Siedlungsvarianten, für die das Gesamt-GWP als ein hoch aggregierter Kennwert ermittelt wurde. Hierfür wurden in einer Excel-Tabelle die Mengenermittlung aus den Siedlungssegmenten ("Siedlungsmassenströme") mit den GWP-Wirkfaktoren mittels eLCA aus der ÖKOBAUDAT-Datenbank (Version OBD_2023_I_A2) verknüpft. Durch die Einbeziehung und Variation weiterer wichtiger Parameter bzw. Einflussfaktoren wie Haushaltsstrom, Pro-Kopf-Wohnfläche (Belegungsdichte einer Wohnung) sowie Stellplatzschlüssel für den ruhenden Verkehr, können im Rechenmodell verschiedene Szenarien berechnet werden.

Im Hintergrund des Rechenmodells befinden sich verschiedene miteinander vernetzte Rechenblätter, durch welche das Ergebnis berechnet wird. Eine Tabelle enthält die Flächendaten aller Bauteile, eine andere die Wirkfaktoren (GWP) für jedes Bauteil, die zuvor durch eine Modellierung in eLCA erhoben wurden. In einer weiteren Tabelle werden die Flächen und Wirkfaktoren in einer Matrix miteinander multipliziert und ergeben das Gesamt-GWP der Siedlungen. Abbildung 9 zeigt ein Schema des Bilanzierungsansatzes sowie dessen Einbettung in den Forschungsprozess.

Abbildung 9:

Verfahren zur Modellentwicklung und vereinfachte Darstellung des Bilanzierungsmodells mit den wichtigsten Systemparametern und weiteren Einflussgrößen



(6) Auswertung, Interpretation und Bewertung der Ökobilanzergebnisse

Die Auswertung der Ökobilanz ermöglicht eine quantitative und qualitative Abschätzung der Umweltauswirkungen (GWP) der gesamten Siedlung sowie einzelnen Teilsystemen oder Parametern. Im Rechenmodell sind aus der Erhebung der Mengengerüste und der GWP-Ermittlung für die einzelnen Komponenten der Parameter insgesamt ca. 60.000 Datenpunkte miteinander verknüpft, die wiederum auf einer Erhebung weiterer Basisdaten beruhen (z.B. Datenermittlung der Kennwerte und Spezifikationen für Konstruktion oder Wärmeversorgungsanlagen aus der ÖKOBAUDAT mittels eLCA). Hieraus entstand ein komplexer Datenraum, in welchem durch die Vielzahl der untersuchten und sich teilweise gegenseitig beeinflussenden Parameter Überlagerungseffekte entstehen. Für die Auswertung wurde daher sogenannte Daten-Dashboards entwickelt, in denen das jeweilige Ergebnis für das GWP der Hauptparameter im Kontext der getroffenen Vorannahmen (wie Siedlungsdichte, Bauweise oder Energiekennwerte) zumeist in Balkendiagrammen dargestellt ist (siehe Kapitel 7). Für die Datenauswertung und -interpretation können damit einzelne Faktoren herausgefiltert werden, um die Wirkmächtigkeit der Parameter zu unterscheiden und übergeordnete Erkenntnisse zu gewinnen.

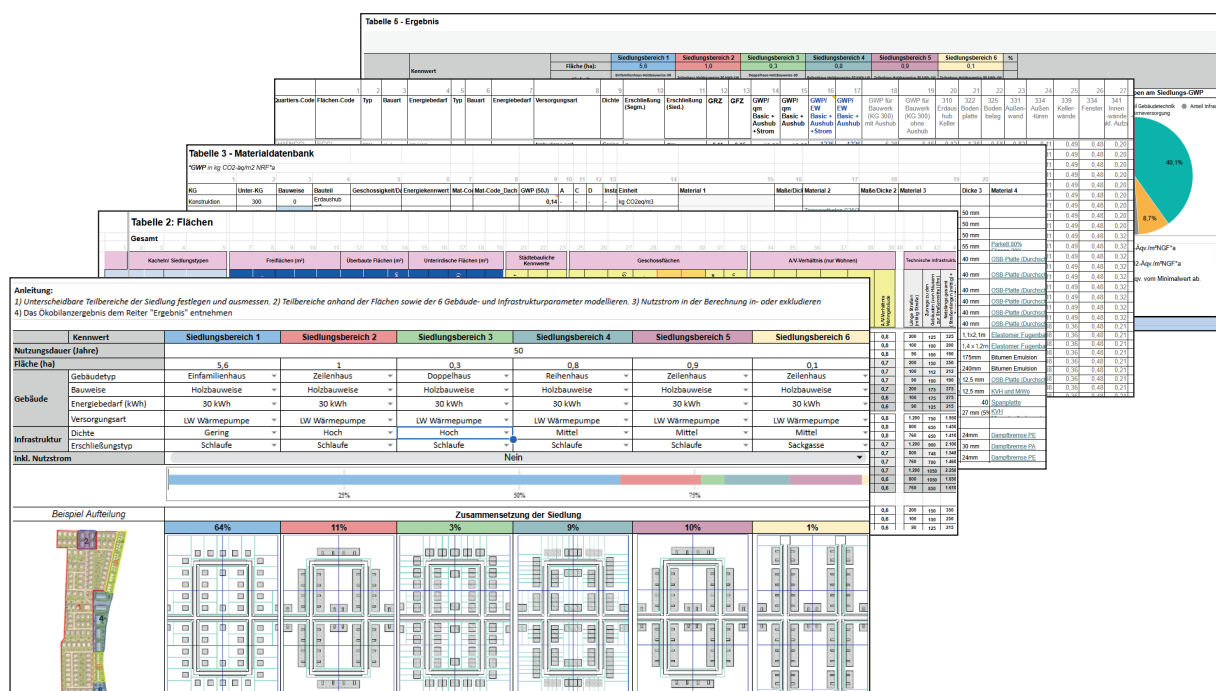
Die Auswertung erfolgte sowohl für die Gesamtheit der 972 idealtypischen Siedlungen als auch für eine Auswahl relevanter Teilsysteme. Die Ergebnisdarstellung erfolgte nach den Hauptparametern oder den Kostengruppen nach DIN 276, aggregiert oder auf Bauteilebene. Als Indikatoren sind das flächenbezogene-GWP in Kilogramm pro Quadratmeter Netto-Raumfläche (NRF) ausgewiesen sowie das personenbezogene-GWP in Kilogramm pro Person - jeweils über einen Bilanzierungszeitraum von 50 Jahren. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsintensität von Wohnungen und Gebäuden (Pro-Kopf-Wohnfläche) führen die Indikatoren partiell zu unterschiedlichen Ergebnissen, was einen Einfluss auf die Interpretation der Ökobilanzergebnisse sowie der daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen hat (siehe Kapitel 7).

(7) Exemplarische Anwendung zur Bilanzierung real gebauter oder zu planender Siedlungen

Neben der Bilanzierung der idealtypischen Siedlungen wurde das Rechentool am Beispiel eines typischen, realen Siedlungsprojektes getestet, das im Rahmen der Siedlungsanalyse (Kapitel 4) erhoben und ausgewertet worden ist. So konnte die Praktikabilität und Benutzerfreundlichkeit für Entscheidungsträger bewertet und verbessert werden. Das Rechentool kann auch dazu genutzt werden, planerische Entscheidungen im Entwurfsprozess zu unterstützen, um durch die Optimierung einzelner Systemelemente das GWP einer Siedlung zu reduzieren. Um eine anwenderfreundliche Nutzung des Bilanzierungsmodells zu ermöglichen, wurde eine Eingabe- und Ausgabeoberfläche zur Dateneingabe und Ergebnisdarstellung entwickelt (Abbildung 10).

Abbildung 10:

Darstellung der Eingabe- und Ausgabemaske des Rechentools mit ausgewählten Rechenblättern zur Ermittlung der Mengengerüste und GWP-Berechnung



Die Eingabe funktioniert nach einem Baukastenprinzip. Die Siedlungssegmente und idealtypischen Siedlungen bilden einen morphologischen und technologischen Typenkatalog, für den im Berechnungsmodell gemäß der definierten Parameterannahmen wie Bauweisen, Energiekennwerte, Wärmeversorgungssysteme oder Siedlungsdichten die GWP-Kennwerte ermittelt wurden. Über die Eingabemaske werden für typengleiche Siedlungsbereiche die entsprechenden Mengengerüste eingegeben, die dann mit dem im Hintergrund des Rechenmodells ermittelten GWP multipliziert werden. Die Ausgabemaske dient dazu, den errechneten GWP-Wert für die ausgewählte Siedlungsstruktur auszugeben und dabei relevante Informationen zum Verständnis des Ergebnisses bereitzustellen, insbesondere eine Aufteilung der Kostengruppen. Die entwickelte Benutzeroberfläche stellt einen Prototypen dar, der durch geeignete Software Lösungen weiterentwickelt werden kann.

(8) Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Abschließend wurden die Ergebnisse zusammengefasst, Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen abgeleitet (Kapitel 9.1 und 9.2). Limitationen und Vorschläge zur Weiterentwicklung des konzeptionellen Modells sowie des Bilanzierungstools sind in Kapitel 9.3 beschrieben. Durch den Forschungsprozess wurden auch weitere Forschungsbedarfe identifiziert, die in Kapitel 9.4 benannt sind.

3.3.3 Methoden- und Datenkritik

Entgegen einer weitverbreiteten Vorstellung liefern Ökobilanzen keine absoluten Aussagen über die Umweltwirkungen des untersuchten Gegenstandes, sondern sie sind v.a. ein Werkzeug, um einen relationalen Vergleich verschiedener Varianten eines qualitativ oder quantitativ vergleichbaren Produkts oder Dienstleistung zu ermöglichen. Bereits der Variantenvergleich eines Gefäßes in unterschiedlichen Materialausführungen wie Papier, Kunststoff, Glas oder Metall ist hinsichtlich Funktionalität, Lebensdauer, Kosten oder Umweltwirkungen sehr komplex. Um so herausfordernder ist die ökologische Bewertung von Siedlungen, da hier eine Vielzahl von Herstellungs- und Nutzungsprozessen einschließlich der jeweiligen Vorketten zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus beruht eine Ökobilanz auf modellhaft angenommenen Systemannahmen, welche die Realität nur in reduziertem Maße repräsentieren können, sowie auf der Datenqualität der Eingangsparameter, die durch jeweiligen technologischen Möglichkeiten und den damit verbundenen ökologischen Auswirkungen zum Zeitpunkt der Erhebung der Daten beeinflusst werden. Effizientere Produktionsverfahren können z.B. den Material- oder Energieaufwand und die damit verbundenen Emissionen eines ansonsten gleichen Bauteils oder technischen Systems reduzieren (vergl. Kapitel 7.3). Auch verhaltens- oder lebensstilabhängige Variablen, wie pro Kopf-Wohnflächen-Inanspruchnahme oder das Mobilitätsverhalten, unterliegen Veränderungen. Vor diesem Hintergrund sind auch die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zu den idealtypischen Siedlungen zu bewerten.

Weiterhin standen zur Erhebung des Mengengerüsts zwei Verfahren zur Wahl. Die erste Variante ist eine Fallstudienbetrachtung, in der repräsentative Bauwerke als Gebäudetypenvertreter ausgewählt, die jeweiligen Wohnflächen sowie der Materialanteil erfasst und bilanziert und die Ergebnisse auf die Siedlungsfläche hochskaliert werden. Die Ergebnisse verschiedener Gebäudetypen etc. könnten so zu jeweils gleich großen Siedlungsflächen in Relation gesetzt werden, um deren Infrastrukturanteil zu erfassen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass sehr präzise Ökobilanzdaten der untersuchten Gebäude erfasst werden, was aber bei einer größeren Anzahl von Gebäuden sehr arbeitsaufwändig wäre und jeweils nur Aussagen über den gewählten Einzelfall zulässt. Dieses Verfahren wurde im Rahmen eines Seminars an der FHP im Wintersemester 2023/24 getestet, aber im Weiteren verworfen.

In der zweiten Variante, die für die Datenerfassung im Forschungsprojekt gewählt wurde, werden die einzelnen Gebäude- und Siedlungselemente parametrisiert und miteinander rekombiniert. Dieses hat den Vorteil, dass mit einem geringeren Aufwand und unter standardisierten Bedingungen eine größere Variantenanzahl in Baukonstruktion, Siedlungs- und Gebäudetechnik sowie zur baulichen Dichte quantitativ ermittelt werden können. So können auch im Nachhinein noch weitere Varianten hinzugefügt werden. Der Nachteil dieses Vorgehens liegt darin, dass diese standardisierten Annahmen zu einer gewissen Nivellierung der Ergebnisse beitragen. Das zeigt sich beispielsweise in den Ergebnissen zu KG 500, wo Siedlungsvarianten mit großen Gebäudetypen bei einer Zunahme deren Siedlungs- und Wohnflächendichte mit einer gleichmäßigen Erhöhung der Einwohner- und Wohnungsanzahl und jeweils gleichen Anstieg an Stellplätzen und GWP verknüpft ist.

3.4 Projektteam, Kooperationspartner und Arbeitsorganisation

Das Projektteam bestand aus Forscherinnen und Forschern von der Leibniz Universität Hannover (LUH), Prof. Dipl.-Ing. Tim Rieniets, Dr.-Ing. Joachim Rosenberger, Martje Banck, B.Sc. und Inka Borchers, B.Sc., sowie von der Fachhochschule Potsdam (FHP), Prof. Dr.-Ing. Michael Prytula, Jana Hack, M.Sc., Luzia Stallmann, B.Sc. und Niclas Gebhardt, M.Sc. .

Die LUH war als Antragstellerin mit allen organisatorischen und administrativen Aufgaben betraut. Außerdem führte die LUH die empirische Erhebung des Siedlungsgeschehens in Deutschland durch, war für die morphologische Modellierung der Siedlungsstrukturen verantwortlich und beteiligte sich an der Auswertung der Ergebnisse der Quartiersökobilanz sowie an der exemplarischen Bilanzierung einer Siedlung.

Die FHP war federführend für die Entwicklung des Konzept- und Bilanzierungsmodells zuständig, konkretisierte dieses durch die Ermittlung der Parameter-Kennwerte und erarbeitete zusammen mit der LUH das Mengengerüst für die Ökobilanzierung der Gebäude- und Infrastrukturen. Hierfür wurde ein Rechenmodell in Excel erstellt und mit den Mengengerüsten und Daten zu den Umweltwirkungen der Materialien - im Rahmen dieses Forschungsprojektes das GWP - gefüllt, die zuvor mittels Berechnungen in eLCA ermittelt wurden.

Das methodische Vorgehen und die damit verbundene Arbeitsorganisation wurden bereits in Kapitel 3.3.2 und in Abbildung 5 dargestellt. Die Vorgehensweise und Arbeitsaufteilung zwischen den Projektpartnern entsprachen im Wesentlichen dem im Forschungsantrag skizzierten Arbeitsplan. Für die Recherche und Auswertung der Inhalte des zweiten Kapitels *Problemstellung - Stand der Forschung* wurde neben eigenen Literatur- und Internetrecherchen auch das multimodale KI-Sprachmodell GPT-4o eingesetzt. Die mit dem Werkzeug generierten Informationen und Datenanalysen wurden vor der weiteren Verwendung sorgfältig geprüft.

Für die Untersuchung des GWP der Wärmeversorgungsanlagen (KG 420) und des Energiebedarfs im Betriebs (B6) wurde seitens der FHP ein Unterauftrag an das Büro greenUP Architektur & Bauberatung vergeben, der von Holger Wolpensinger (Geschäftsführung und Gründer) sowie Kristina Viehmann (Mitarbeiterin im Büro) bearbeitet wurde. Im Rahmen dieser Kurzstudie wurden relevante Wärmeversorgungsanlagen recherchiert und für eine Auswahl das GWP über den Lebenszyklus von 50 Jahren ermittelt. Die Ökobilanzierung der Anlagentechnik wurde mit eLCA unter Verwendung von Kenndaten aus anderen Quellen durchgeführt.

Weitere Informationen zum Projektteam und den Projektbeteiligten sind in Kapitel 10 ausgeführt.

4. Empirische Erhebung des Siedlungsgeschehens in Deutschland

Ziel der empirischen Erhebung war es, einen Überblick über das aktuelle Siedlungsgeschehen in Deutschland zu gewinnen. Besonderes Interesse galt dabei jenen hochbaulichen und städtebaulichen Merkmalen der Siedlungen, von denen anzunehmen war, dass sie signifikante Auswirkungen auf die Ökobilanz haben würden und die daher in der Modellbildung berücksichtigt werden sollten.

Diesem Ziel entsprechend wurde die empirische Untersuchung zum einen darauf abgestimmt, das aktuelle Siedlungsgeschehen in Deutschland abzubilden und zum anderen ein Modell für die Bilanzierung von Siedlungen zu entwickeln, um diese Siedlungen hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen bewerten zu können. Forschungsleitende Fragen hierzu waren:

- Welche Siedlungsstrukturtypen wurden besonders häufig gebaut?
- Wie unterscheiden sich diese hinsichtlich ihrer Ökobilanz?
- Welche Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen können daraus für den zukünftigen Siedlungsbau abgeleitet werden?

Nach eingehender Literaturrecherche musste festgestellt werden, dass keine Fachliteratur vorhanden ist, der die notwendigen Daten und Informationen über das Siedlungsgeschehen in Deutschland zu entnehmen sind. Insbesondere zu den hochbaulichen und städtebaulichen Merkmalen, die im Zentrum dieses Forschungsprojektes stehen, waren kaum Informationen zu finden.

Eine Übersicht über das aktuelle Siedlungsgeschehen in Deutschland bietet das BBSR-Forschungsprojekt "Neue Stadtquartiere – Konzepte und gebaute Realität" (Freudenau et al. 2021). In diesem Projekt wurden erstmals systematisch quantitative und qualitative Befunde zu aktuellen Neubauquartieren in Deutschland publiziert. Die Studie gibt einen Überblick über Stadtquartiere, die "(1) nach 1990 gebaut wurden, (2) mehr als 500 Wohnungen oder mehr als 1.000 Einwohnerinnen und Einwohner haben oder bei vorhandener Wohnfunktion größer als 10 Hektar sind und (3) auf Grundlage eines städtebaulichen Konzepts entstanden sind" (Freudenau et al. 2021:4). Diese Studie enthält aber keine Aussagen zu den baulichen und städtebaulichen Merkmalen, die im Zentrum des eigenen Forschungsinteresses liegen (z.B. Gebäudetypen, Konstruktionsweisen, Erschließungstypen). Daher wurde zu Beginn dieses Forschungsprojekts eine eigene Recherche durchgeführt, die auf die Erfassung der baulichen und städtebaulichen Merkmale aktueller Neubausiedlungen in Deutschland ausgerichtet war.

4.1 Methodik zur Erhebung des Siedlungsgeschehens

Mit dem Ziel, die gesamte Bandbreite unterschiedlicher Siedlungstypen in die Untersuchung einzubeziehen, umfasste das Suchraster Neubausiedlungen aus allen 16 Bundesländern, aus Klein-, Mittel- und Großstädten sowie Projekte der Außen- wie auch der Innenentwicklung. Die Auswahlkriterien orientieren sich an denen des genannten BBSR-Forschungsprojektes "Neue Stadtquartiere". Ein wesentlicher Unterschied liegt aber in der Mindestgröße der erfassten Siedlungen. Während die Untergrenze im Projekt "Neue Stadtquartiere" bei 500 Wohneinheiten lag, wurde sie im vorliegenden Projekt auf 250 Wohneinheiten abgesenkt, um den Siedlungsbau in Klein- und Mittelstädten besser erfassen zu können. Gleichzeitig sind Siedlungen mit 250 Wohneinheiten ausreichend groß, damit sich ihre städtebaulichen Merkmale (z.B. Art der Erschließung, Dichte) aussagekräftig abbilden. Zudem wurde in der vorliegenden Arbeit im Gegensatz zum genannten Forschungsprojekt auf eine Mindestgröße der bebauten Fläche verzichtet, um auch verhältnismäßig kompakte, innerstädtische Quartiersentwicklungen in der Untersuchung repräsentieren zu können.

Die Anzahl der Wohneinheiten eines Projekts wurde aus den Angaben der jeweiligen Entwicklungsträger oder Kommunen übernommen. Als Wohneinheiten galten abgeschlossene Wohnungen mit eigenen Zugängen. Bei Projekten, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung noch nicht fertiggestellt waren, ließ sich jedoch nicht überprüfen, ob die Zahl der tatsächlich realisierten Wohneinheiten der Zahl der geplanten Wohneinheiten entspricht.

Für die Untersuchung wurden ausschließlich Siedlungen mit Baubeginn zwischen den Jahren 2010 und 2020 berücksichtigt. In diesem Zeitraum, zwischen dem Ende der Auswirkungen der Finanzkrise von 2008 und dem Beginn der Coronapandemie, herrschten in Deutschland relativ konstante Rahmenbedingungen auf dem Immobilienmarkt. Die Nachfrage war hoch und wurde ab 2015 durch die Flüchtlingskrise zusätzlich gesteigert. Die Bauzinsen lagen zwischen 2012 und 2022 unter 3 % und das Baugewerbe erlebte einen kontinuierlichen Aufschwung. Siedlungen, die in diesem Zeitraum gebaut wurden, stellen die Grundgesamtheit der nachfolgenden Untersuchungen dar.

Bei Siedlungen der gesuchten Größenordnung (> 250 Wohneinheiten) wird die Wohnnutzung häufig um weitere Nutzungen ergänzt. Dies führt zu einer gewissen Diversität in der Nutzungsstruktur, die sich auch in den baulichen und städtebaulichen Merkmalen dieser Siedlungen niederschlägt. Um dennoch eine Vergleichbarkeit der Projekte sicherzustellen, wurde der Anteil von Nicht-Wohnnutzungen im Kernbereich einer Siedlung auf maximal 5 % der gesamten realisierten Bruttogeschossfläche festgesetzt. Wurden größere Nicht-Wohngebäude (z.B. Schulen, Einzelhandel, etc.) in Randbereichen einer Siedlung geplant, so wurden diese Bereiche bei der Betrachtung außer Acht gelassen und die Untersuchungsflächen entsprechend verkleinert.

Die Recherche stützte sich überwiegend auf Veröffentlichungen, die entweder von den beauftragten Planungsbüros stammen oder von den Kommunen, die für die Beauftragung bzw. für die Genehmigung der Siedlungen verantwortlich waren. Neben den Websites der betreffenden Büros und Kommunen dienten auch Fachzeitschriften und Expertengespräche als Quellen. Es wurde davon ausgegangen, dass ein Großteil der Siedlungen mit über 250 Wohneinheiten auf diese Weise veröffentlicht wurde und für eine repräsentative Erhebung der benötigten Daten ausreichend ist. Wie hoch der Anteil der Projekte ist, die nicht in dieser Form veröffentlicht wurden, ist nicht bekannt.

Aufgrund der gewählten Mindestanzahl an realisierten Wohneinheiten ist anzunehmen, dass insbesondere die Siedlungstätigkeiten in Klein- und Mittelstädten unterrepräsentiert sind, da dort der Schwellenwert von 250 Wohneinheiten pro Siedlung häufig unterschritten wird. Auch die Erfassung von Ein- und Zweifamilienhausgebieten stellte sich als problematisch heraus, weil die Planung solcher Gebiete nicht immer durch externe Büros erfolgt, sondern häufig von den verantwortlichen Ämtern selbst durchgeführt wird und darum möglicherweise nicht in den oben erwähnten Medien veröffentlicht ist.

Wie groß der Anteil von Ein- und Zweifamilienhausgebieten am Siedlungsgeschehen in Deutschland ist, lässt sich den Baustatistiken entnehmen. Im Jahr 2020 existierten in Deutschland über 16 Millionen Ein- und Zweifamilienhäuser, was einem Anteil 83 % an allen Wohngebäuden entspricht (ARGE 2022: 9). Im Betrachtungszeitraum (2010 bis 2020) wurden der Bau von über 1,1 Millionen Wohneinheiten in Ein- und Zweifamilienhäusern genehmigt (Statistisches Bundesamt 2022: 3). Das entspricht 43 % aller in diesem Zeitraum genehmigten Wohneinheiten und bestätigt die Annahme, dass nur ein Bruchteil dieser Häuser durch die oben beschriebene Erhebung erfasst werden konnte. Der Umstand, dass Ein- und Zweifamilienhäuser in der vorliegenden Untersuchung unterrepräsentiert sind, ist bei den weiter unten folgenden Auswertungen zu beachten.

Wie andere Studien zeigen, sind die Umweltauswirkungen von Ein- und Zweifamilienhäusern im Vergleich zu anderen Gebäudetypen besonders groß. Drei Fünftel des Endenergieverbrauchs aller Wohngebäude entfallen auf Ein- und Zweifamilienhäuser, was 11 % der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland entspricht. Demzufolge liegt im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser ein erhebliches Potenzial für die Einsparung von Endenergie und die Reduktionen von Treibhausgasemissionen (ARGE 2022: 12).

4.2 Ergebnisse der Erhebung des Siedlungsgeschehens

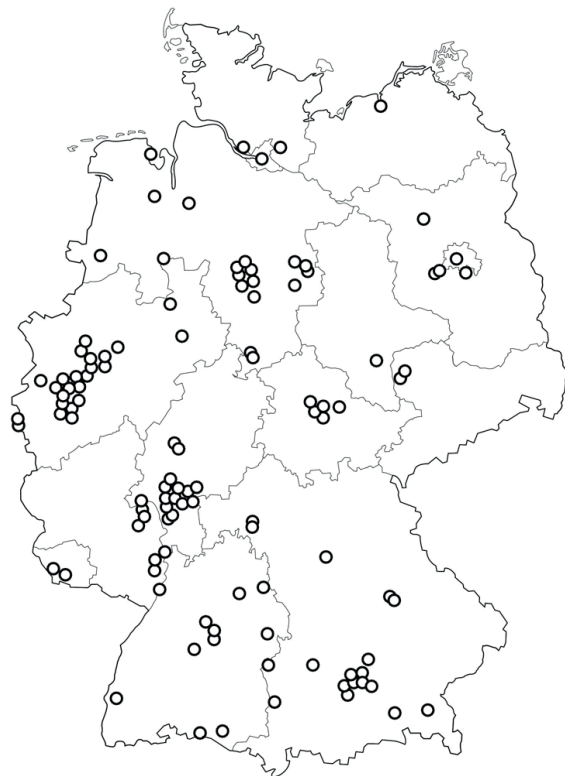
4.2.1 Lagemerkmale

Auf Grundlage des oben beschriebenen Suchrasters – bestehend aus Baujahr, Siedlungsgröße und Nutzungsverteilung – wurden insgesamt 128 Neubausiedlungen in ganz Deutschland identifiziert. Davon wurden 24 Siedlungen in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt, da kein Zugang zu ausreichendem Daten-, Plan- und Bildmaterial gegeben war. Somit ergibt sich eine Grundgesamtheit von deutschlandweit 104 Siedlungen, die im Weiteren ausgewertet wurden (Abbildung 11). Tabelle 1 bietet einen Überblick zu allen 104 analysierten Neubausiedlungen mit den jeweiligen Lagemerkmale, den identifizierten Erschließungs- und Gebäudetypen sowie über die errechneten städtebaulichen Dichten.

Die größte Anzahl der vorgefundenen Projekte befindet sich in Nordrhein-Westfalen (24), gefolgt von Bayern (17), Niedersachsen (15), Baden-Württemberg (12) und Hessen (11). Die wenigsten Siedlungen konnten in Bremen, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt (jeweils nur ein Projekt) identifiziert werden (Abbildung 12). Wird die Anzahl der Neubausiedlungen in Beziehung zur Einwohnerzahl der jeweiligen Bundesländer gesetzt, so relativieren sich die großen Diskrepanzen. Die Anzahl der Siedlungen pro eine Million Einwohner liegt in allen Bundesländern zwischen 0,5 (Sachsen und Sachsen-Anhalt) und 2,0 (Saarland) (Abbildung 13).

Abbildung 11:

Lage der erfassten Siedlungen in Deutschland



Um allgemeine Trends im aktuellen Siedlungsgeschehen in Deutschland erkennen zu können, wurden noch weitere Lagemerkmale erfasst:

1. Stadtgröße, unterteilt in: Klein-, Mittel- und Großstädte
2. Leitbild der Stadtentwicklung, unterteilt in Außen- und Innenentwicklung.

Stadtgröße

Die Kategorisierung der Stadtgrößen orientiert sich an der Definition des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung zu Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland. Als Großstädte zählen Gemeinden eines Gemeindeverbandes oder Einheitsgemeinden mit mindestens 100.000 Einwohnern, als Mittelstädte Gemeinden mit 20.000 bis unter 100.000 Einwohnern und als Kleinstädte Gemeinden mit 5.000 bis unter 20.000 Einwohnern (BBSR 2023).

Leitbilder der Stadtentwicklung

Unter den Begriffen Innen- und Außenentwicklung werden Leitbilder der Raum- und Stadtentwicklung verstanden. Unter Außenentwicklung wird die Erweiterung des Siedlungskörpers durch erstmalige Inanspruchnahme von zumeist landwirtschaftlich genutzten Flächen am Stadtrand verstanden. Die Innenentwicklung

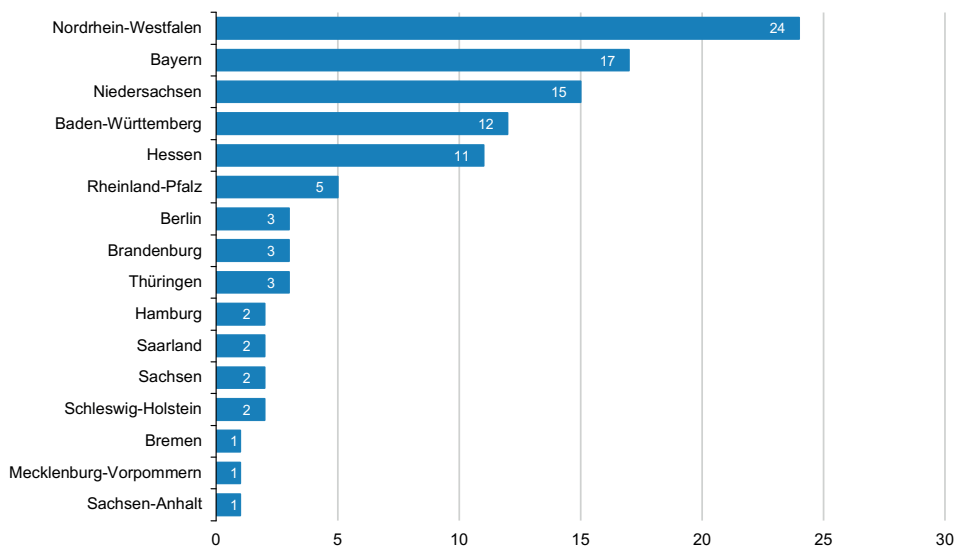
Tabelle 1:
Übersicht über die erfassten Projekte (in alphabetischer Reihenfolge)

Nr.	Projektname	Bundesland	Stadtgröße			Lage		Erschließungs- typen			Gebäudetypen						Quartiers- GFZ gesamt
			Kleinstadt	Mittelstadt	Großstadt	Innen- entwicklung	Außen- entwicklung	Sackgasse	Schlarfe	Gitter	EFH	DH	RH	PH	ZE	BW	
1	Albert-Schweitzer-Carré, Herne	Nordrhein-Westfalen			●	●			●				●		●	●	1,1
2	Alter Flughafen Gießen	Hessen		●		●			●	●				●	●		1,0
3	Alte Weberei, Tübingen	Baden-Württemberg		●		●					●		●	●	●		1,0
4	Am Erlenhof, Ahrensburg	Schleswig-Holstein		●				●	●	●		●	●	●			0,2
5	Am Fluss, Speyer	Rheinland-Pfalz		●		●										●	1,1
6	Am Klosterpark, Göttingen	Niedersachsen			●	●				●		●	●	●		●	0,7
7	Am Mauchenheimer Weg, Alzey	Rheinland-Pfalz		●				●	●		●		●				0,3
8	Bahnhofsareal Schwäbisch Hall	Baden-Württemberg		●		●			●					●	●	●	1,2
9	Beerenbruch Viertel, Castrop-Rauxel	Nordrhein-Westfalen		●				●		●		●	●	●			0,4
10	Bergisches Plateau, Wuppertal	Nordrhein-Westfalen			●	●			●	●		●	●	●			0,4
11	Berghöfe Riedberg, Frankfurt	Hessen			●	●			●	●				●	●	●	1,1
12	Bergkaserne, Gießen	Hessen		●		●				●	●		●	●			0,7
13	Biegen-Durlacher Weg, Hochstetten	Baden-Württemberg	●					●	●	●		●	●	●			0,3
14	Bismarckquartier, Würzburg	Bayern			●	●								●	●	●	1,9
15	Brecht-Park Rostock	Mecklenburg-Vorpom.			●	●					●			●	●		0,3
16	Buchholzer Grün, Hannover	Niedersachsen			●	●				●					●	●	0,9
17	Candis I und II, Regensburg	Bayern			●	●				●				●	●		1,1
18	dahoam, Vaterstetten	Bayern		●				●	●			●	●		●		0,7
19	Das Dörnberg, Regensburg	Bayern			●	●			●				●	●	●	●	1,3
20	Dichterviertel, Bochum	Nordrhein-Westfalen			●	●				●				●	●	●	1,3
21	Dobelhalde, Memmingen	Bayern		●				●		●		●	●			●	0,3
22	Domagkpark, München	Bayern			●	●			●	●				●		●	0,9
23	Emsauenpark, Reuschberge	Niedersachsen		●		●				●	●		●	●			0,2
24	Europakarree, Erfurt	Thüringen			●	●										●	0,8
25	Europaviertel Boulevard, Frankfurt	Hessen			●	●			●					●		●	1,4
26	Feldmark, Bochum	Nordrhein-Westfalen			●	●					●	●	●	●	●	●	0,9
27	Franzenbrunnen, Saarbrücken	Saarland				●		●			●	●	●	●			0,4
28	Goethequartier, Offenbach	Hessen			●	●								●	●	●	1,8
29	Grünheide, Bielefeld	Nordrhein-Westfalen			●			●		●		●	●			●	0,5
30	Havekant, Oldenburg	Niedersachsen			●	●								●	●	●	1,9
31	Havelufer Quartier, Berlin	Berlin			●	●				●				●	●	●	1,5
32	Heimat Hafner, Konstanz	Baden-Württemberg		●				●	●		●		●	●	●	●	0,9
33	Hellwinkel Terrassen, Wolfsburg	Niedersachsen			●			●		●			●	●		●	0,9
34	Herler Straße Köln	Nordrhein-Westfalen			●	●									●	●	1,1
35	Herzoghöfe, Darmstadt	Hessen			●	●								●	●	●	1,8
36	Hirtenwiese 2, Crailsheim	Baden-Württemberg		●				●	●	●		●		●			0,2
37	Hohe Düne, Gifhorn	Niedersachsen		●		●				●				●			0,5
38	Hohenbuschel, Dortmund	Nordrhein-Westfalen			●			●	●	●		●	●				0,2
39	HOMERUN, Mannheim	Baden-Württemberg			●	●					●			●		●	1,2
40	Hornbrucher Bogen, Dortmund	Nordrhein-Westfalen			●	●				●			●			●	1,0
41	Hubland Würzburg	Bayern			●	●					●	●	●	●	●	●	0,3
42	Im Metzgergrün, Freiburg	Baden-Württemberg			●				●					●	●	●	1,0
43	Jettenhauser Esch, Friedrichshafen	Baden-Württemberg		●		●					●		●	●	●		1,4
44	Josef-Felder-Straße, München	Bayern			●	●										●	1,8
45	Kirschberg-Quartier, Weimar	Thüringen		●		●				●				●	●		1,1
46	Krampnitz, Potsdam	Brandenburg			●			●	●		●		●	●	●	●	0,6
47	Kronprinzenviertel, Dortmund	Nordrhein-Westfalen			●	●				●			●	●		●	0,7
48	Kronsrode-Mitte, Hannover	Niedersachsen			●	●					●					●	1,0
49	Liesel Quartier, Göttingen	Niedersachsen			●	●								●	●	●	1,8
50	Lincoln-Siedlung, Darmstadt	Hessen			●	●									●		1,3
51	Lindenauer Hafen, Leipzig	Sachsen			●	●			●				●	●	●	●	1,1
52	Lok. West, Esslingen	Baden-Württemberg		●		●					●				●	●	1,9

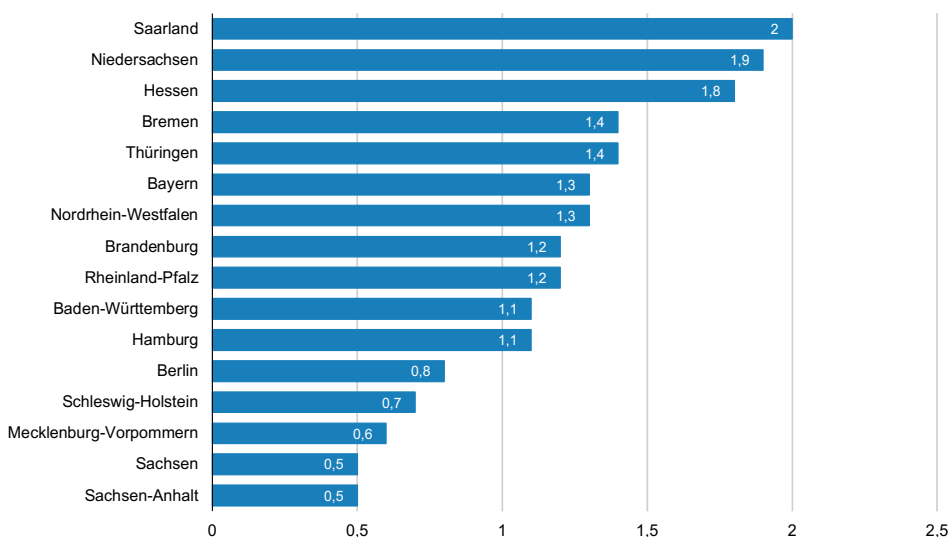
Nr.	Projektname	Bundesland	Stadtgröße			Lage		Erschließungs- typen			Gebäudetypen						Quartiers- GFZ gesamt
			Kleinstadt	Mittelstadt	Großstadt	Innen- entwicklung	Außen- entwicklung	Sackgasse	Schleife	Gitter	EFH	DH	RH	PH	ZE	BW	
53	Martini-Park, Augsburg	Bayern			•	•				•				•	•	•	0,9
54	maxfrei, Düsseldorf	Nordrhein-Westfalen			•	•										•	1,6
55	Mika-Quartier, Dresden	Sachsen			•	•							•			•	1,7
56	Mühlbachgärten, Traunstein	Bayern	•				•		•		•	•	•	•			0,8
57	Mühlbachviertel, Dachau	Bayern		•		•		•								•	0,9
58	Neckarpark, Stuttgart	Baden-Württemberg			•	•				•				•	•	•	1,6
59	Neues Wohnen Choweiler, Köln	Nordrhein-Westfalen			•	•			•						•	•	1,3
60	Nördl. Ringgebiet (1.BA), Braunsch.	Niedersachsen			•	•				•			•		•		1,1
61	Park Linné, Köln	Nordrhein-Westfalen			•	•			•				•	•	•	•	1,2
62	Parkstadt Eggerstedt, Pinneberg	Schleswig-Holstein		•		•			•		•			•			0,2
63	Paul-Gerhard-Allee, München	Bayern			•	•			•					•		•	1,1
64	Pergolenviertel, Hamburg	Hamburg			•	•		•								•	1,0
65	Pionier Siedlung Hanau	Hessen		•		•				•	•	•	•	•	•		0,6
66	Plouquet-Areal, Heidenheim	Baden-Württemberg		•		•								•	•		1,3
67	Posthof Karree, Erfurt	Thüringen			•	•				•					•	•	1,2
68	Prinz Eugen Park, München	Bayern			•	•		•						•	•	•	0,8
69	Quartier Bergäcker, Nürtingen	Baden-Württemberg		•			•	•						•	•	•	1,4
70	Quartier Dessauer Straße, Berlin	Berlin			•	•			•					•	•		1,3
71	Quartier Guter Freund, Aachen	Nordrhein-Westfalen			•	•										•	1,6
72	Quartier 4.0, Offenbach	Hessen			•	•			•						•	•	1,1
73	Quartier IV Sonnenkamp, Wolfsburg	Niedersachsen			•		•		•	•	•	•	•				0,4
74	Quartier Tafel, Nürnberg	Bayern			•	•										•	1,2
75	Q-Quartier, Solingen	Nordrhein-Westfalen			•	•			•						•	•	1,5
76	Rheinufer Süd, Ludwigshafen	Rheinland-Pfalz			•	•		•		•				•	•	•	1,0
77	Riedberg Mitte, Frankfurt	Hessen			•		•	•	•						•	•	1,0
78	Seestadt mg+, Mönchengladbach	Nordrhein-Westfalen			•	•			•					•	•	•	1,0
79	Sonnenhöfe, Schönefeld	Brandenburg	•			•				•				•	•		1,1
80	Speicherstadt, Potsdam	Brandenburg			•	•								•	•	•	1,8
81	Spinnereipark, Kolbermoor	Bayern	•				•							•	•		0,8
82	Springbacher Höfe, Paderborn	Nordrhein-Westfalen			•		•	•	•		•	•	•	•			0,4
83	SteinPark, Freising	Bayern		•		•		•					•		•		0,7
84	Südcampus Bad Homburg	Hessen		•		•			•					•	•	•	1,0
85	Tarpenbeker Ufer, Hamburg	Hamburg			•	•								•	•		0,4
86	Tuchmacherviertel, Aachen	Nordrhein-Westfalen			•	•	•			•		•	•	•	•	•	1,0
87	Vierzig549, Düsseldorf	Nordrhein-Westfalen			•	•		•		•				•	•	•	1,6
88	Viktoria-Areal, Unna	Nordrhein-Westfalen		•		•			•				•	•	•		1,1
89	Vitalquartier, Hannover	Niedersachsen			•		•		•				•		•	•	0,8
90	Waldviertel Rodenkirchen, Köln	Nordrhein-Westfalen			•	•		•	•					•	•		1,2
91	Wasserstadt Limmer, Hannover	Niedersachsen			•	•		•	•						•	•	1,3
92	WATERKANT Berlin (Teilprojekt 1)	Berlin			•	•		•	•					•	•		1,2
93	Weserhöfe, Bremen	Bremen			•	•										•	2,5
94	Wesseling-Eichholz	Nordrhein-Westfalen		•			•		•		•						0,2
95	Wiley-Süd, Neu-Ulm	Bayern		•			•			•	•	•	•	•			0,5
96	Wiesbadenbrücke, Wilhelmshaven	Niedersachsen		•		•				•						•	2,3
97	Wohn-campus, Halle (Saale)	Sachsen-Anhalt			•		•			•						•	1,9
98	Wohnen am Fluss, Speyer	Rheinland-Pfalz		•		•								•	•	•	1,0
99	Wohnen im Hochfeld, Düsseldorf	Nordrhein-Westfalen			•		•		•		•	•	•		•		0,8
100	Wohnquartier Herzkamp, Hannover	Niedersachsen			•		•		•			•	•		•	•	0,8
101	Wohnquartier Ostend, Hildesheim	Niedersachsen			•	•				•					•	•	1,0
102	Wohnstadt Süd Saarlouis	Saarland		•			•			•	•						0,2
103	Worringer Straße, Düsseldorf	Nordrhein-Westfalen			•	•										•	2,0
104	Zollhafen Mainz	Rheinland-Pfalz			•	•		•						•		•	1,3
Anzahl Projekte			4	31	69	78	26	28	47	30	25	24	36	57	69	63	Ø 1,0

Abbildung 12:

Verteilung der untersuchten Projekte nach Bundesländern

**Abbildung 13:**

Anzahl Siedlungen pro 1 Mio. Einwohner nach Bundesländern



zielt auf "die bauliche (Wieder-)Nutzung von un- oder untergenutzten Flächen innerhalb von erschlossenen und zusammenhängend bebauten Siedlungsbereichen" (vergl. u.a. Reiß-Schmidt 2018: 995 ff.). Da Siedlungen in der Außenentwicklung mit der Versiegelung von Böden, dem Bau neuer Infrastrukturen und der Erzeugung neuer Verkehrsströme assoziiert werden, gelten sie in der Planungspraxis als weniger nachhaltig.

4.2.2 Städtebauliche Strukturmerkmale

Trotz großer Ähnlichkeiten der erfassten Siedlungen in Bezug auf Konstruktionsweisen, Gebäudetypen und Erschließungen, waren bei genauerer Betrachtung vielfältige Variationen und Nuancen der baulichen Merkmale erkennbar. Da die Untersuchung zum Ziel hatte, typische Merkmale im aktuellen Siedlungsbau zu identifizieren, wäre der Versuch einer detaillierten und vollumfänglichen Beschreibung aller Merkmale nicht zielführend gewesen. Stattdessen konzentrierte sich die Untersuchung nur auf diejenigen baulichen und strukturellen Merkmale von Siedlungen, die ökologisch signifikante Auswirkungen haben und die im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes in der Modellbildung und der Ökobilanzierung von Siedlungen Anwendung finden sollten. Das betrifft insbesondere folgende drei Kategorien:

- **Gebäudetypen** unterscheiden sich erheblich in ihrer Form und Größe. Ihre geometrischen Eigenschaften haben Einfluss darauf, wie viel Wärmeverluste eine Wohneinheit über die Außenflächen verursacht. Während beispielsweise ein Einfamilienhaus über mindestens vier Außenwände und eine Dachfläche verfügt, hat eine Wohnung im Geschosswohnungsbau zumeist einen geringeren Außenwandanteil. Die Gesamtheit immer gleicher Gebäudetypen wird vorliegend als Bebauungstyp bezeichnet.
- **Erschließungstypen** haben wesentliche Auswirkungen auf das räumliche und funktionale Grundgerüst einer Siedlung und auf die Mengen an verkehrlichen und technischen Infrastrukturen. Die Erschließungstypen bestimmen die verkehrliche Organisation und definieren maßgeblich den Zuschnitt und die Größe der Baufelder einer Siedlung.
- **Dichtegrade** - als sogenannte Quartiers-GFZ - geben Auskunft über die Dichte der baulichen Strukturen einer Siedlung. Diese resultiert aus der Anzahl der Gebäude, deren Grundflächen sowie deren Geschossigkeiten und sie beschreibt die flächenmäßige Effizienz einer Siedlungsentwicklung. Das Berechnungsverfahren wird weiter unten beschrieben.

Kombinationen dieser Merkmale werden nachfolgend als Siedlungsstruktur bezeichnet. Konnten im weiteren Verlauf der Forschung Merkmalskombinationen identifiziert werden, die überdurchschnittlich häufig auftraten, so handelt es sich hierbei in der vorliegenden Untersuchung um sogenannte Siedlungsstrukturtypen. Die Untersuchung erfolgte auf Grundlage von Daten- sowie von Plan- und Bildmaterial wie Lagepläne, Grundrisse, Gelände- und Gebäudeschnitte, Luftbilder und perspektivische Darstellungen. Das Material wurde anhand von Literatur- und Internetrecherchen gesammelt und das grafische Material maßstabsgerecht aufbereitet. Fehlende Pläne wurden bei Kommunen und Planenden angefragt.

Gebäudetypen

Mit der Typologisierung von Gebäuden haben sich bereits verschiedene Autoren befasst, wie Curdes (1997), Korda (2005) und Weidner (2020). Die aus der Literatur bekannten Definitionen von Gebäudetypen waren für das vorliegende Forschungsprojekt nur bedingt geeignet und wurden durch eigene Definitionen erweitert bzw. präzisiert. Für die Typisierung von Gebäuden wurden folgende vier Merkmale herangezogen:

1. Anzahl von Wohneinheiten pro abgeschlossenem Gebäude,
2. räumliche Anordnung der Wohneinheiten innerhalb eines Gebäudes,
3. Art der Erschließung der Wohneinheiten sowie
4. geometrische Merkmale und räumliche Ausrichtungen.

Ein Einfamilienhaus besteht aus einer einzigen Wohneinheit in einem abgeschlossenen Gebäude. Einliegerwohnungen blieben hierbei unberücksichtigt, da deren Anzahl nicht aus dem der Recherche zugrunde liegenden Daten-, Plan- und Bildmaterial entnommen werden konnte. Ein Doppelhaus besteht aus zwei benachbarten Wohneinheiten in einem abgeschlossenen Gebäude, die baulich voneinander getrennt sind. Bei einer linearen Aneinanderreihung von drei oder mehr Einfamilienhäusern ohne seitlichen Grenzabstand handelt es sich um ein Reihenhauses. Auch bei diesen Gebäudetypen wurden Einliegerwohnungen nicht berücksichtigt. Der in der Literatur vorzufindende Typ des Kettenhauses, bei dem die Einfamilienhäuser nicht linear, sondern in freier Folge aneinandergereiht sind, wird unter den Typ des Reihenhauses subsumiert.

Bei den oben genannten Gebäudetypen werden alle Wohneinheiten unmittelbar von der Straße erschlossen. Im Geschosswohnungsbau, der mehrere Wohneinheiten auf mehr als einer Etage umfasst, werden einzelne oder mehrere Wohneinheiten über gemeinsame Treppenhäuser erschlossen. Des Weiteren richtet sich die Definition dieser Gebäudetypen über die geometrischen Merkmale der Gebäude. Dabei wird zwischen Punkthäusern, Zeilen sowie Blöcke und Winkel unterschieden. Um ein Punkthaus handelt es sich dann, wenn es sich um ein freistehendes Gebäude mit zentralen Erschließungskern ohne eindeutige Ausrichtung handelt.

Als Zeile werden dagegen gerichtete Baukörper, häufig mit mehreren Erschließungskernen und eindeutigen Vorder- und Rückseiten geführt. Weitere Geschosswohnungsbauten, also auch mäander- oder kammförmige Gebäude, wurden als Blöcke und Winkel zusammengefasst.

Erschließungstypen

Straßen übernehmen zentrale Funktionen innerhalb eines Siedlungszusammenhangs. Primär dienen sie der Erschließung der einzelnen Liegenschaften. Darüber hinaus schaffen sie bauliche Abstände zwischen den gegenüberliegenden Gebäuden, die der Belichtung und Belüftung der Gebäude dienen und für den Schutz der Privatsphäre genutzt werden können (z.B. durch Vorgärten, Einfriedung, Sichtschutz). Außerdem werden Straßen für den spontanen nachbarschaftlichen Austausch genutzt, für Freizeitaktivitäten und für das Spielen von Kindern.

Straßen können diesen Aufgaben in unterschiedlichster Weise gerecht werden, sowohl was ihre Dimensionierung, Ausstattung und Gestaltung betrifft, aber auch in der Art und Weise, wie sie als lineare, bauliche Elemente durch den Siedlungsraum geführt und miteinander verknüpft werden. Je nachdem, nach welchen räumlichen Prinzipien die Straßen miteinander verknüpft werden, entstehen unterschiedliche Erschließungstypen.

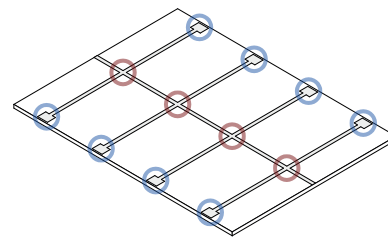
Im Rahmen dieses Forschungsprojektes war von besonderem Interesse, wie sich die verschiedenen Erschließungstypen auf die Ökobilanzierung auswirken. Um diese Frage beantworten zu können, bedurfte es genauer Daten dazu, wie viel Verkehrsfläche und wie viele Laufmeter der unter den Straßen befindlichen Infrastrukturen (Kanalisation, Leitungen) für die verschiedenen Erschließungstypen benötigt werden.

Um die Erschließungstypen aktueller Siedlungsprojekte identifizieren zu können, bedurfte es zunächst einer geeigneten Definition. Diese Definition wurde mit Bezug auf vorhandene Literatur (Marshall 2005) und auf Grundlage eigener Analysen entwickelt. Sie richtet sich nach der Anzahl der Straßen, die an den jeweiligen Kreuzungspunkten münden. Aus den in der Untersuchung vorgefunden Erschließungsvarianten konnten drei übergeordnete Typen identifiziert werden: Der Sackgassen-, der Schlaufen- sowie der Gittertyp (Abbildung 14). Häufig bestehen die in der Planungspraxis gewählten Lösungen aus Kombinationen von mehreren der drei Typen.

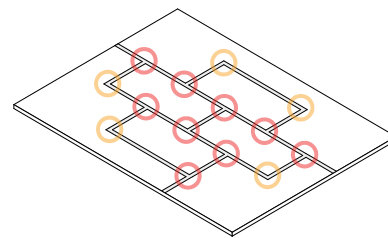
Abbildung 14:

Veranschaulichung der Definitionen von unterschiedlichen Erschließungstypen

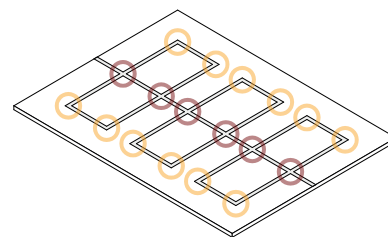
a) Beispiel Sackgassentyp: Die Straßen münden - von der Haupterschließungsstraße aus kommend - alle in einer Sackgasse (blaue Kennzeichnung). Nur entlang der Haupteerschließung entstehen Kreuzungspunkte (hier mit je vier Straßenmündungen, dunkelrote Kennzeichnung). Diese bleiben unberücksichtigt, da sie nicht in der Mehrzahl sind.



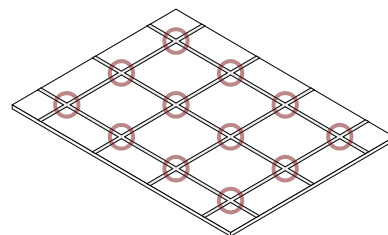
b) Beispiel Schlaufentyp: Die Schlaufen gehen ineinander über. Es münden zwei bis drei Straßen an den Kreuzungspunkten (gelbe und orangefarbene Kennzeichnung).



c) Beispiel Schlaufentyp: Die Schlaufen sind getrennt voneinander angeordnet. Die dunkelrot gekennzeichneten Kreuzungspunkte mit vier Straßenmündungen bleiben unberücksichtigt, da sie nicht in der Mehrzahl sind.



d) Beispiel Gittertyp: An den Kreuzungspunkten münden überwiegend vier Straßen (dunkelrote Kennzeichnung).



Münden in der Mehrheit zwei bis drei Straßen an Kreuzungspunkten, so handelt es sich um einen Schlaufentyp. Im Falle, dass überwiegend vier Straßen an Kreuzungspunkten münden, handelt es sich dagegen um einen Gittertyp. Beim Sackgassentyp existieren in der Mehrheit keine Kreuzungspunkte an den Straßenenden. Die Anschlüsse an bestehende Straßennetze bleiben bei der vorliegenden Definition generell unberücksichtigt. Bei größeren Projekten, die in ihren Teilbereichen unterschiedliche Erschließungstypen aufweisen sowie bei Projekten, bei denen kein Erschließungstyp eindeutig überwiegt, wurden die Kombinationen der unterschiedlichen Erschließungstypen benannt. Bei Siedlungsentwicklungen, die überwiegend oder ausschließlich auf bereits vorhandene Erschließungen zurückgreifen, was insbesondere bei sehr kompakten innerstädtischen Nachverdichtungen der Fall ist, wurde das Merkmal des Erschließungstyps nicht in die Untersuchung mit einbezogen.

Dichtegrade

Die Siedlungsdichte wird als sogenannte „Quartiers-GFZ“ dargestellt. Für deren Berechnung wurden alle Bruttogeschosflächen (BGF) einer Siedlung addiert und in das Verhältnis zur gesamten Entwicklungsfläche, inklusive Verkehrs-, Grün- sowie sonstigen Freiflächen, gesetzt. Die Quartiers-GFZ unterscheidet sich damit erheblich von der gebräuchlichen GFZ, bei der sich die Geschossflächen auf die reinen Grundstücksflächen beziehen und daher nicht dazu geeignet ist, den Dichtegrad einer Siedlung in seiner Gesamtheit zu beschreiben. Die Größe der jeweiligen Entwicklungsflächen wurde überwiegend aus den Angaben der jeweiligen Entwicklungsträger oder der Kommunen übernommen. Wenn kein Zugang zu den Daten gegeben war, wurden die Flächengrößen aus Planunterlagen oder Satellitenbildern ausgemessen. Die Begrenzungslinien bildeten dabei die für den Wohnungsbau entwickelten Flächen - Grünflächen und Nicht-Wohnbauflächen in Randbereichen wurden nicht in die Flächenbetrachtung mit einbezogen. In zentralen Bereichen einer Siedlung gelegene, zusammenhängende Grünflächen, die mehr als ein Drittel der gesamten Siedlungsfläche ausmachen, blieben - zur besseren Vergleichbarkeit der Dichtegrade der baulichen Strukturen untereinander - ebenfalls unberücksichtigt.

4.3 Auswertung

4.3.1 Lagemerkmale

Der Überblick über die Lage der untersuchten Projekte zeigt auf, dass sich die Mehrzahl der zwischen 2010 und 2020 entwickelten Siedlungen in Großstädten (66,5%) befindet. Während 29,5 % der Projekte noch in Mittelstädten geplant oder realisiert wurden, finden sich in Kleinstädten lediglich 4 % der untersuchten Siedlungen. Bei insgesamt drei Vierteln der untersuchten Projekte handelt es sich um Neubausiedlungen der Innenentwicklung. Dabei machen den deutlich größten Anteil der Siedlungen, die dem vorliegenden Suchraster entsprechen, Innenentwicklungen in Großstädten aus (insgesamt 56 % aller Projekte; Abbildung 15). Dort werden 84 % aller Siedlungen in der Innenentwicklung realisiert. In den Mittelstädten sind es 61 %, während in Kleinstädten der Anteil der Außenentwicklungen mit 75 % überwiegt (Abbildung 16).

Abbildung 15:

Verteilung der untersuchten Projekte nach Stadtgröße sowie nach Entwicklungsstrategie

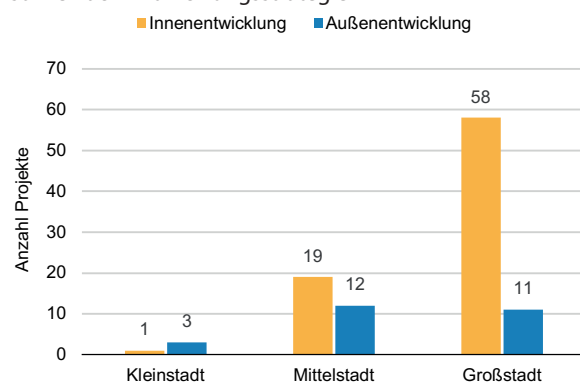
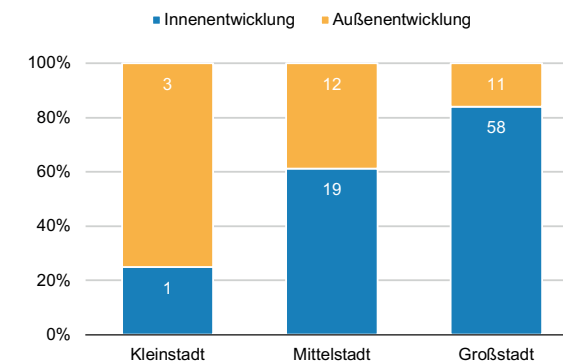


Abbildung 16:

Anteilige Verteilung der untersuchten Projekte nach Stadtgröße sowie nach Entwicklungsstrategie



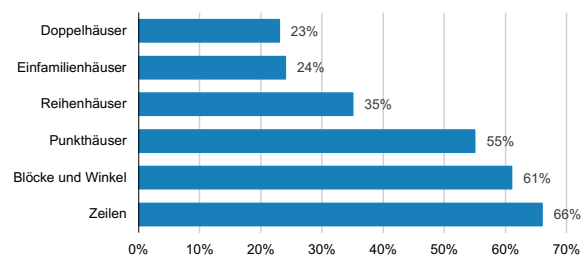
4.3.2 Städtebauliche Strukturmerkmale

Die städtebaulichen Strukturmerkmale der Neubausiedlungen (Gebäude- und Erschließungstypen sowie Dichtegrade) wurden für eine Gesamtübersicht zunächst jeweils getrennt voneinander untersucht. In den weiteren Schritten wurden die jeweiligen Merkmale miteinander in Beziehung gesetzt – zunächst jeweils zwei der Merkmale und abschließend alle drei. Auf diese Weise konnten besondere Häufungen von Merkmalskombinationen identifiziert werden (Siedlungsstrukturtypen).

Gebäudetypen

Der am häufigsten geplante Gebäudetyp ist die Zeile, sie ist bei 66 % der untersuchten Projekte zu finden (Abbildung 17). Ebenfalls häufig sind Blöcke und Winkel (bei 61 % der Projekte) sowie Punkthäuser (bei 55 % der Projekte) Bestandteil der Planungen. Damit ist der Gesamtanteil des Geschosswohnungsbaus bei den untersuchten Projekten mehr als doppelt so hoch (rund 69 %) wie der Anteil der Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser (insgesamt 31 %). Es ist aber zu beachten, dass insbesondere reine Ein- und Zweifamilienhaussiedlungen nur teilweise erfasst werden konnten und die entsprechenden Gebäudetypen in der Realität vermutlich häufiger vertreten.

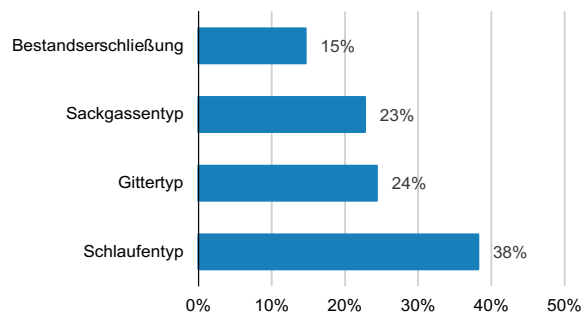
Abbildung 17:
Verteilung Gebäudetypen



Erschließungstypen

Als Erschließungstyp wird in der Planungspraxis die Schlaufenerschließung mit einem Anteil von 38 % am häufigsten gewählt. Siedlungen mit Gitter- oder Sackgassentypen machen einen Anteil von lediglich 24 bzw. 23 % aus. 15 % der Projekte greifen ausschließlich auf bereits bestehende Erschließungen zurück (Abbildung 18). Bei rund 20 % aller untersuchten Projekte lassen sich Kombinationen aus zwei Erschließungstypen finden. Dabei sind Kombinationen aus Sackgassen- und Schlaufentypen besonders häufig zu finden (62 %; Abbildung 19).

Abbildung 18:
Verteilung Erschließungstypen



Dichtegrade

Die Spannbreite der Quartiers-GFZ der Projekte liegt zwischen 0,2 und 2,5 (Abbildung 20). Dabei liegt die durchschnittliche Dichte bei 1,0. In diesem Bereich findet sich auch die relative Mehrheit der Projekte wieder (rund 13 %). Weitere Häufungen lassen sich bei Siedlungen besonders geringer Dichte (0,2 bis 0,4) sowie einer besonders hohen Dichte (1,8 bis 1,9) ablesen (Abbildung 20).

Abbildung 19:
Verteilung kombinierter Erschließungstypen

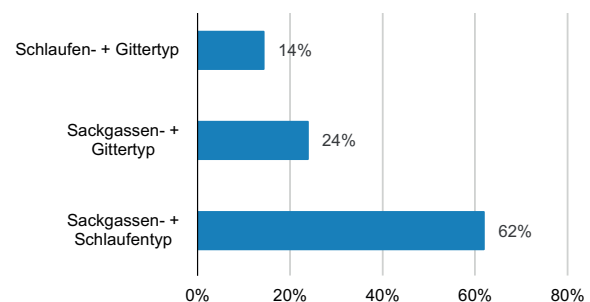
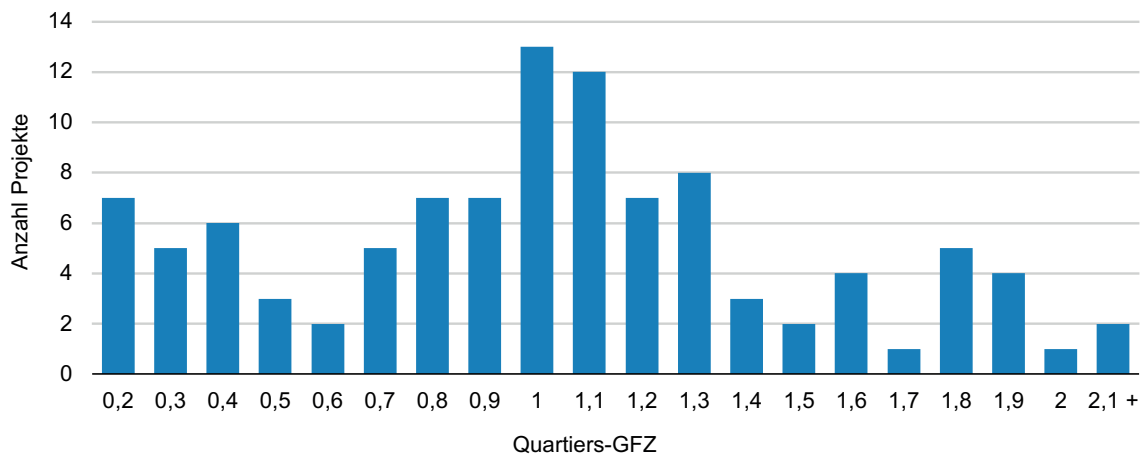


Abbildung 20:

Verteilung der Projekte nach Siedlungsdichten (Quartiers-GFZ)

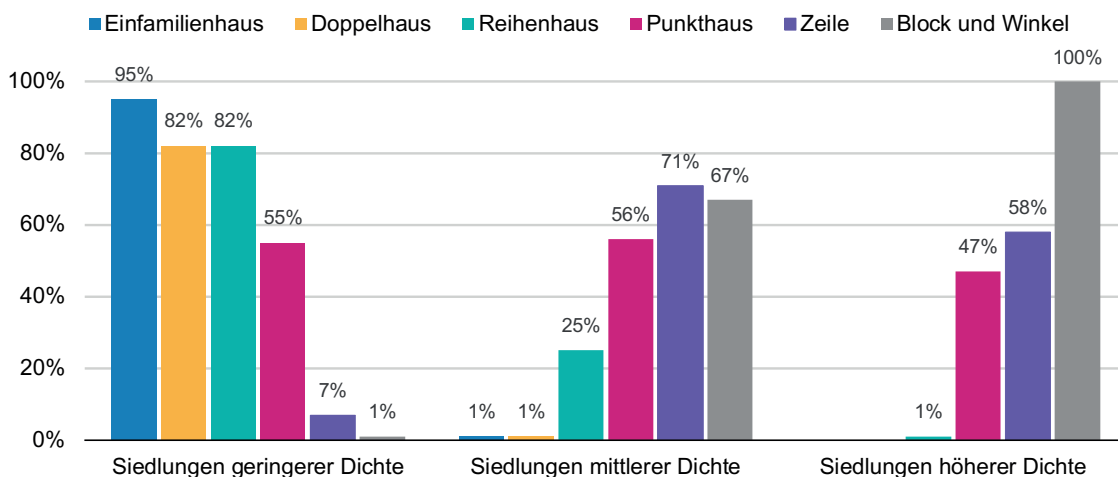


Zusammenhänge zwischen Gebäudetypen und Dichtegraden

Werden die Siedlungsdichten in drei Gruppen unterteilt (geringere Dichte bei einer Quartiers-GFZ bis 0,7, mittlere Dichte bei einer Quartiers-GFZ zwischen 0,8 und 1,4 und höhere Dichte ab einer Quartiers-GFZ von 1,5), lassen sich deutliche Abhängigkeiten zwischen Dichte und Bebauungstypen feststellen. Siedlungen geringerer Dichte haben dabei einen wesentlich höheren Anteil an Einfamilien-, Reihen- und Doppelhäusern. Während diese in 95 % (Einfamilienhäuser) bzw. 82 % (Doppel- sowie Reihenhäuser) der Neubausiedlungen mit geringerer Dichte vorzufinden sind, handelt es sich in Siedlungen höherer Dichte fast ausschließlich um Geschosswohnungsbauten in Form von Blöcken und Winkeln (Abbildung 21).

Abbildung 21:

Vorkommen der Gebäudetypen in Siedlungen unterschiedlicher Dichte

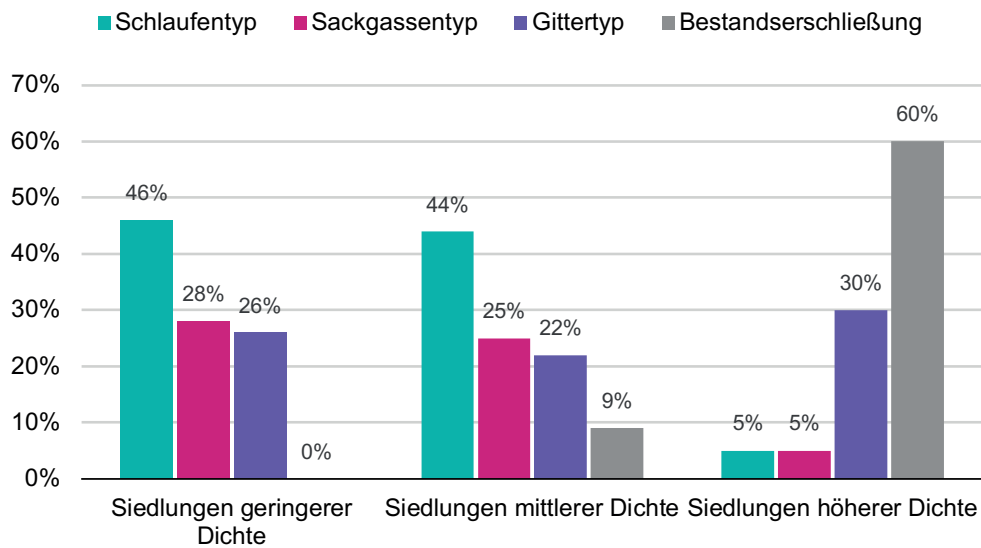


Zusammenhänge zwischen Erschließungstypen und Dichtegraden

Auch bei der Verteilung der Erschließungstypen lässt sich ein deutlicher Zusammenhang mit den Siedlungsdichten ablesen. Bei Siedlungen mit geringerer oder mittlerer Dichte dominieren Schlaufentypen, die dort bei 46 bzw. 44 % der Planungen Anwendung finden. Bei Siedlungen höherer Dichte ist deren Anteil dagegen signifikant geringer (5 %). Dort wird am häufigsten auf Bestandserschließungen zurückgegriffen (60 %), was darauf zurückzuführen ist, dass es sich bei Siedlungen hoher Dichte häufig um Nachverdichtungsmaßnahmen im innerstädtischen Kontext handelt. Bei Siedlungen höherer Dichte steigt darüber hinaus der Anteil des Gittertyps an (30 %) (Abbildung 22).

Abbildung 22:

Verteilung der Erschließungstypen nach Siedlungsdichte

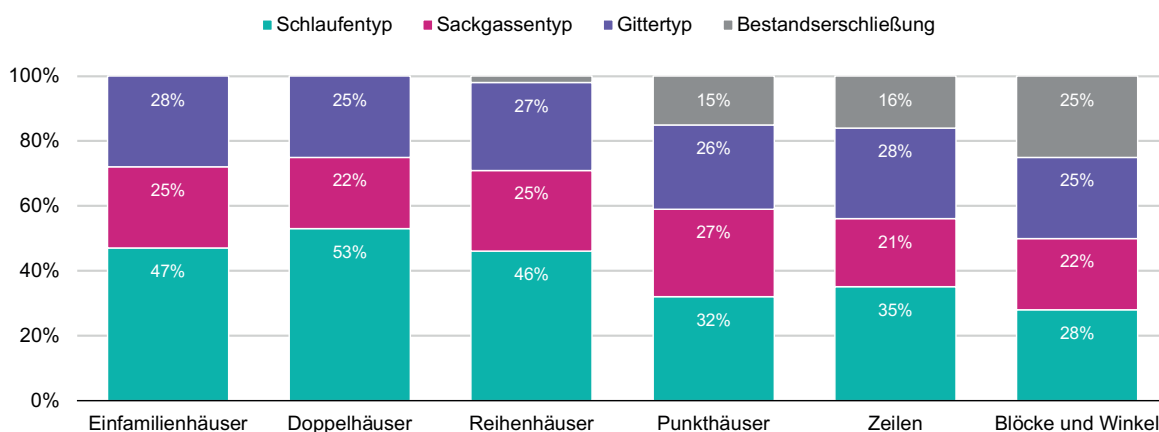


Zusammenhänge zwischen Erschließungs- und Gebäudetypen

Ein Vergleich der unterschiedlichen Gebäudetypen und ihren verkehrlichen Erschließungskonzepten zeigt auf, dass der Schlaufentyp durchgängig überwiegt, dieser allerdings besonders häufig bei Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern angewandt wird (Abbildung 23). Während die Häufigkeit von Gitter- sowie Sackgassenerschließungen, unabhängig von den jeweiligen Gebäudetypen, gleichbleibend bei zwischen 21 % und 28 % liegt, lassen sich deutliche Abhängigkeiten zwischen städtebaulichen Konzepten, die ausschließlich auf bereits bestehende Erschließungen zurückgreifen und den dazu gewählten Gebäudetypen identifizieren. Der prozentuale Anteil der Projekte mit Bestandserschließungen ist dabei in Neubauquartieren mit Block- und Winkeltypen mit 25 % am höchsten, gefolgt von Quartieren mit Zeilen- und Punkthausbebauungen (16 % bzw. 15 %). Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei Neubauquartieren mit Block- und Winkeltypen zumeist um städtebauliche Entwicklungen hoher Dichte (und kompakten Grundflächen) in umliegend bebauten Kontexten handelt (vgl. Abbildung 19, 20 und 23). Hier konnte häufig auf bereits bestehende, umliegende Straßennetze zur Sicherstellung der verkehrlichen Erschließung zurückgegriffen werden. Einfamilien- oder Doppelhausbebauungen sind dagegen in der Kombination mit dem Rückgriff auf bestehende Erschließungen nicht auszumachen.

Abbildung 23:

Verteilung der Erschließungstypen nach Gebäudetypen

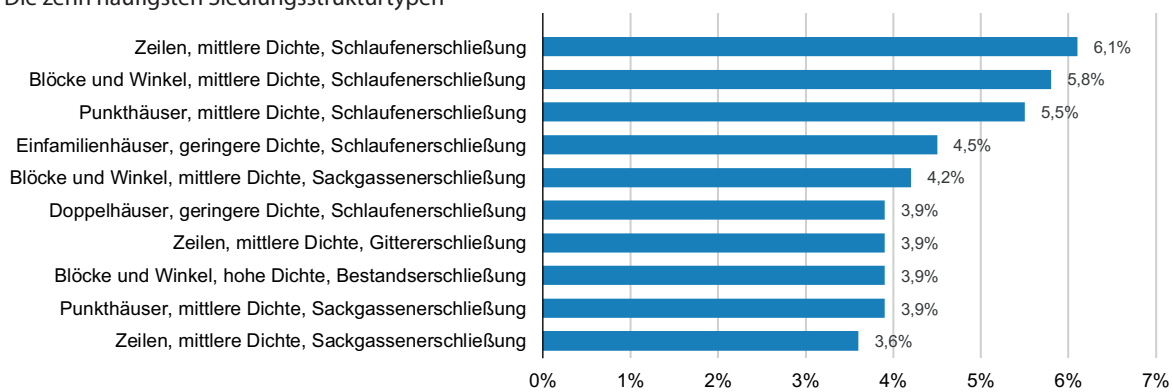


Zusammenhänge zwischen allen drei städtebaulichen Strukturmerkmalen (Siedlungsstrukturtypen)

Werden die drei Strukturmerkmale „Gebäudetyp“, „Erschließungstyp“ sowie „Siedlungsdichte“ (diese unterteilt in drei Gruppen) miteinander kombiniert, so lassen sich Siedlungsstrukturtypen im Sinne der hier zugrunde liegenden Definition identifizieren, die besonders häufig in der Planung von Neubauquartieren vorzufinden sind. In der Berechnung wurden – in den Fällen, in denen Siedlungen nicht nur aus jeweils einem, sondern aus mehreren Gebäude-, Erschließungs- und Dichtetypen bestehen – die entsprechenden Teilbereiche berücksichtigt (insgesamt 131). Am häufigsten ließen sich Siedlungen oder Teilbereiche von Siedlungen mit Zeilentypen sowie einer Bebauung mittlerer Dichte und einer als Schlaufentyp ausgebildeten Erschließung identifizieren (6,2 %). Ebenfalls über 5 % machen Strukturtypen mit Blöcken und Winkeln mittlerer Bebauungsdichte und einer Schlaufenerschließung aus, sowie Punkthausbebauungen mittlerer Dichte und ebenfalls einer Schlaufenerschließung (Abbildung 24).

Abbildung 24:

Die zehn häufigsten Siedlungsstrukturtypen



4.3.3 Zusammenhänge zwischen Lage- und Strukturmerkmalen

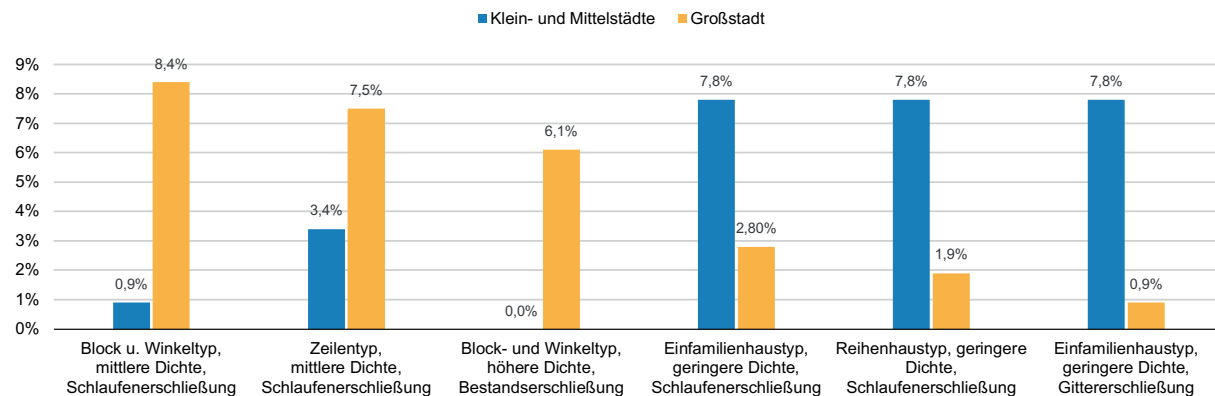
Nach der Identifizierung der insgesamt am häufigsten vorkommenden Siedlungsstrukturtypen in den untersuchten Neubausiedlungen sollten abschließend mögliche Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Siedlungsstrukturtypen und deren jeweiliger Lage überprüft werden. Die Überprüfung gibt sowohl Aufschluss darüber, welche Strukturtypen in Groß- sowie in Klein- und Mittelstädten am häufigsten Anwendung finden, als auch darüber, welche Strukturtypen in der Innen- bzw. in der Außenentwicklung dominant sind.

Zusammenhänge zwischen Siedlungsstrukturtyp und Stadtgrößen

Bei einem Vergleich, welche Kombinationen von Strukturmerkmalen (Siedlungsstrukturtypen) in Neubausiedlungen in Klein- und Mittelstädten oder aber in Großstädten am häufigsten vorzufinden sind, zeigen sich deutliche Differenzen. Während in Großstädten eine Kombination von Block- und Winkeltypen mittlerer Bebauungsdichte und einer Schlaufenerschließung mit 8,4 % aller Entwicklungen den größten Anteil ausmacht, kommt diese in der Planungspraxis in Klein- und Mittelstädten so gut wie gar nicht zur Geltung (0,9 %). Andersherum verhält es sich bei den dominanten Strukturtypen in Klein- und Mittelstädten: Einfamilienhausbebauungen geringerer Dichte in Kombination mit Schlaufenerschließungen sind dort mit 7,8 % am häufigsten vorzufinden. In Großstädten liegt deren Anteil lediglich bei 2,8 %. Der insgesamt am häufigsten geplante bzw. realisierte Strukturtyp, bestehend aus einem Zeilentyp mittlerer Dichte und einer Schlaufenerschließung findet sich vorzugsweise in Großstädten wieder (7,5% aller Projekte), hat mit 3,4 % aber auch einen realen Anteil am Siedlungsgeschehen in Klein- und Mittelstädten (Abbildung 25).

Abbildung 25:

Verteilung der drei jeweils am häufigsten vorkommenden Strukturmerkmalkombinationen nach Stadtgröße im Vergleich

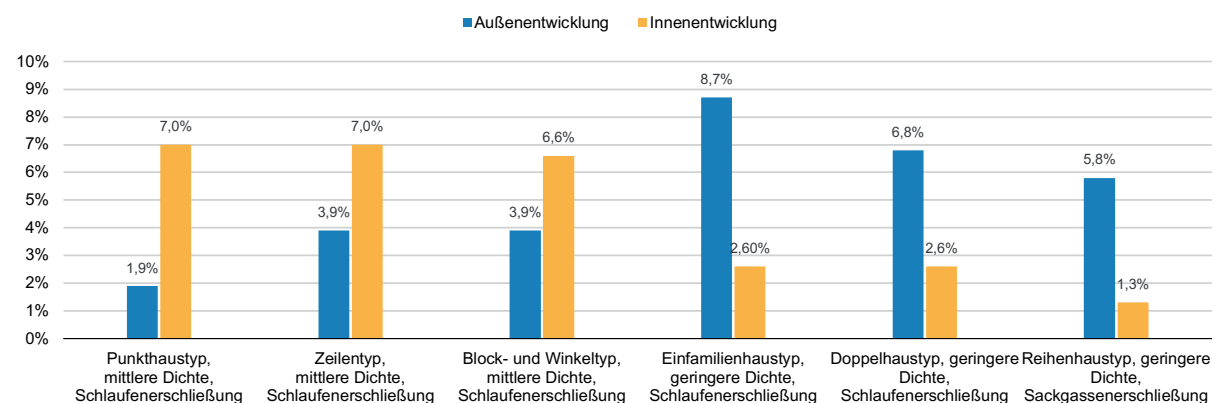


Zusammenhänge zwischen Siedlungsstrukturtyp und Entwicklungsstrategie

Ähnlich dem Vergleich der am häufigsten vorkommenden Kombinationen von Strukturmerkmalen zwischen Groß- sowie Mittel- und Kleinstädten (Abbildung 25), zeigt auch der Vergleich zwischen Projekten der Außen- und der Innenentwicklung hinsichtlich der dort jeweils dominierenden Siedlungsstrukturtypen deutliche Unterschiede auf (Abbildung 26). Bei Neubausiedlungen der Innenentwicklung werden am häufigsten Punkt- und Zeilenhaustypen mittlerer Dichte mit Schlaufenerschließungen kombiniert (jeweils 7,0 % der Innenentwicklungsprojekte). Diese Merkmalskombinationen kommen hingegen bei Neubausiedlungen in der Außenentwicklung deutlich seltener vor. Dort werden am häufigsten Einfamilienhausbebauungen geringerer Dichte in Kombination mit Schlaufenerschließungen projektiert (8,7 %), die wiederum bei Innenentwicklungen nur eine untergeordnete Rolle spielen (2,6 %).

Abbildung 26:

Verteilung der drei jeweils am häufigsten vorkommenden Strukturmerkmalkombinationen nach Entwicklungsstrategie im Vergleich



Basierend auf der Erhebung und Analyse von Neubausiedlungen aus dem Zeitraum 2010 bis 2020 konnte in diesem Kapitel aufgezeigt werden, welche baulichen Merkmale für den zeitgenössischen, deutschen Siedlungsbau prägend sind. Welche Bedeutung diese Merkmale für die ökologische Bilanz der Siedlungen haben und welche Empfehlungen sich daraus für die zukünftige Planung von Siedlungen ableiten lassen, ist in Kapitel 7.2 beschrieben.

5. Morphologische Modellierung der Siedlungsstrukturen

5.1 Methodik

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, einerseits Aussagen darüber treffen zu können, welche Ökobilanzen die unterschiedlichen, derzeit in Deutschland realisierten Siedlungsstrukturen aufweisen. Andererseits sollen Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden, mit deren Hilfe die ökologischen Auswirkungen neuer Siedlungsentwürfe annäherungsweise berechnet werden können.

Mit dieser Zielsetzung ging die Notwendigkeit einher, eine Methode zu entwickeln, mit welcher es möglich war,

- die große Menge und Vielfalt der baulichen Strukturen einer Siedlung (Gebäude, Straßen, technische Infrastrukturen), mit vertretbarem Aufwand erfassen und bilanzieren zu können.
- Siedlungen unterschiedlicher Größe und städtebaulicher Ausprägung hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen (hier GWO) vergleichen zu können.
- darzustellen, welche ökologischen Auswirkungen einzelne Einflussfaktoren im Siedlungszusammenhang haben.

Müsste jedes bauliche Element einer Siedlung separat erfasst und ausgewertet werden – wie es bei der Ökobilanzierung einzelner Gebäude üblich ist – wäre das aufgrund der deutlich höheren Anzahl an Elementen mit erheblichem Aufwand verbunden. Außerdem wäre die Aussagekraft der Bilanzierungsergebnisse, die auf diese Weise gewonnen würden, auf die betreffende Siedlung beschränkt. Die Übertragbarkeit auf bzw. der Vergleich mit anderen Siedlungen wäre nur möglich, wenn andere Siedlungen mit gleichem Aufwand erfasst und bilanziert würden. Außerdem könnten durch dieses Vorgehen nur eingeschränkt Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Wirkung die einzelnen Einflussfaktoren auf das Bilanzierungsergebnis der Siedlung haben.

Dieses methodische Problem konnte gelöst werden, indem anstelle eines deduktiven Verfahrens (ausgehend vom gesamten Siedlungsraum) ein induktives Verfahren entwickelt wurde (ausgehend von kleineren Raumeinheiten). Zu diesem Zweck wurden zunächst in den zuvor erhobenen Siedlungsprojekten (s. Kapitel 4) Bereiche mit in sich einheitlichen Strukturmerkmalen – also mit einheitlichen Gebäude- und Erschließungstypen sowie Dichtegraden – identifiziert. Im nächsten Schritt wurden diese Bereiche hinsichtlich ihrer Bebauung und Erschließung analysiert, um die so gewonnenen Daten und Informationen im dritten Schritt in eine vereinheitlichte Form zu übertragen. Auf diese Weise konnten so genannte Siedlungssegmente entwickelt werden, die sich zwar hinsichtlich ihrer Strukturmerkmale voneinander unterschieden, aber alle auf der gleichen Grundfläche und auf den gleichen Darstellungsprinzipien basieren. Diese Siedlungssegmente können beliebig miteinander kombiniert werden, so dass sich aus ihnen verschiedenste Siedlungen (existierende oder geplante) annäherungsweise nachbilden lassen.

Mit Hilfe der Siedlungssegmente war es nun möglich, die oben aufgezählten Anforderungen zu erfüllen: Sie erlauben es, Siedlungen trotz der Menge und Vielfalt ihrer baulichen Elemente mit vergleichsweise geringem Aufwand zu erfassen, zu bilanzieren und miteinander zu vergleichen. Außerdem können die Siedlungssegmente zu so genannten idealtypischen Siedlungsstrukturen kombiniert werden (s. Kapitel 5.3), auf deren Grundlage die Wirkung einzelner Einflussfaktoren auf die Ökobilanz einer Siedlung sichtbar gemacht werden können.

5.2 Modellierung von Siedlungssegmenten

Um eine möglichst große Kongruenz zwischen den Siedlungssegmenten und dem realen Siedlungsgeschehen in Deutschland sicherzustellen zu können, dienten die 104 in Kapitel 4 beschriebenen Siedlungen als Referenzen. In diesen Siedlungen wurden zunächst Bereiche mit einheitlichen Strukturmerkmalen identifiziert, die im Folgenden als Siedlungsbereiche bezeichnet werden. Diese Bereiche zeichnen sich durch in sich homogene strukturelle Ausprägungen und eine jeweils gleichbleibende Kombination von Gebäudetyp, Erschließungstyp und Dichte aus. Siedlungsbereiche, deren städtebauliches Konzept wesentlich durch eine starke Topographie bestimmt werden, wurden aufgrund ihrer Besonderheit bei der weiteren Betrachtung außer Acht gelassen. Die Identifizierung der Siedlungsbereiche erfolgte auf Grundlage des verfügbaren Plan- und Bildmaterials. Anhand der zugrunde liegenden Kriterien konnten in den untersuchten Neubausiedlungen insgesamt 131 Bereiche ausgemacht werden. Diese Bereiche bildeten die Grundlage für die Modellierung der Siedlungssegmente.

Für die Siedlungssegmente erwies sich eine Fläche 100 x 100 Metern als optimal. Diese Fläche ist ausreichend groß, um alle Strukturmerkmale einer Siedlung aussagekräftig abbilden zu können, aber sie ermöglichte zugleich, die große Komplexität der Siedlungsstrukturen auf ein Minimum zu reduzieren. Da sich in der Untersuchung gezeigt hat, dass eindeutige Siedlungstypen erst ab einer Größe von rund 5.000 m² übertragbare Erkenntnisse liefern, wurden jeweils sechs Siedlungssegmente zu idealtypischen Siedlungen aggregiert (vergl. Kapitel 5.3). Außerhalb von Baufeldern gelegene Grün- und Freiflächen wurden nicht in die Untersuchung einbezogen, da ansonsten die Vergleichbarkeit unterschiedlicher baulicher Strukturen hinsichtlich ihrer Dichte nicht gegeben war. Aus den Ausprägungen der städtebaulichen Strukturmerkmalen der Gebäude- und Erschließungstyp sowie Dichtegraden konnten weitere Merkmale wie Gebäudekubaturen, Gebäudegrundflächen, Geschossigkeiten und Dachformen abgeleitet werden. Ausprägungen der konstruktiven und materiellen Gebäudemerkmale waren hingegen für die Modellierung der Segmente, die zu diesem Zeitpunkt lediglich ein räumlich-strukturelles Siedlungsgerüst darstellten, nicht relevant. Sie wurden erst zu einem späteren Zeitpunkt in die Untersuchung einbezogen. Gleiches gilt für die materielle und konstruktive Beschaffenheit der Verkehrsinfrastrukturen sowie für die technischen Infrastrukturen.

Die Segmente bestehen aus einer Verkehrsfläche und einem jeweils einheitlichen Gebäudetypus mit einer einheitlichen Geschossigkeit sowie einer einheitlichen Dachform. Sie spiegeln die in der Praxis je nach Gebäudetyp vorgefundenen Dichtegrade differenziert wieder und können mit drei verschiedenen Erschließungen (Gitter, Schlaufe oder Sackgasse) kombiniert werden (siehe Abbildung 27). Die Siedlungssegmente wurden grafisch dargestellt und die für die Bilanzierung relevanten Kennwerte tabellarisch erfasst.

5.2.1 Gebäudetypen

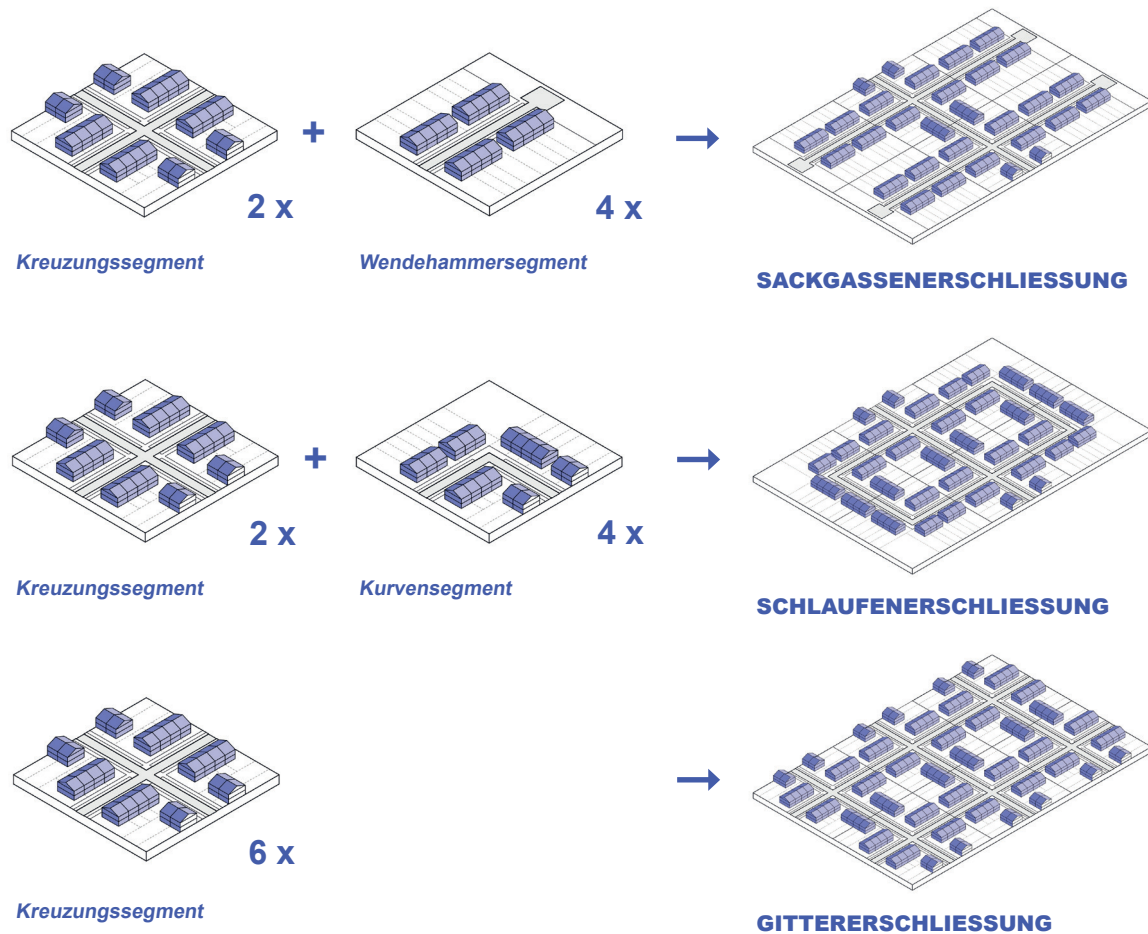
Die sechs Gebäudetypen Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhäuser, Punkthaus, Zeile sowie Block und Winkel konnten hinsichtlich ihrer Gebäudegrundflächen, Geschossigkeiten, Dachformen sowie ihrer unterirdischen Flächen (Keller, Tiefgaragen) auf Grundlage der Datenerhebungen zum Siedlungsgeschehen in Deutschland modelliert werden.

Gebäudegrundflächen

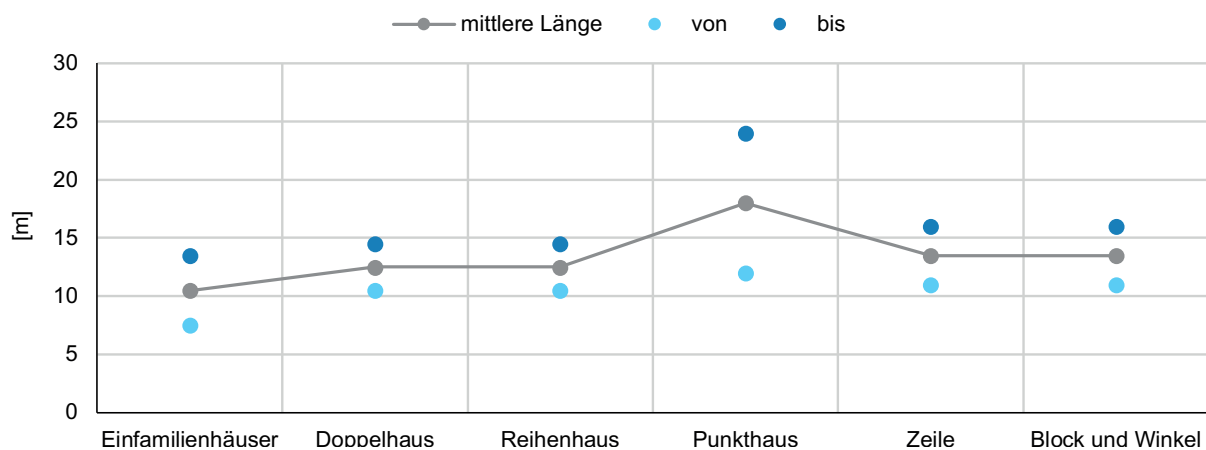
Für die Modellierung der Gebäudegrundflächen wurden anhand der realen Siedlungen aus Kapitel 4 zunächst die vorgefundenen Grundflächen, sortiert nach Gebäudetyp, erhoben. Um die Geometrien der Grundflächen möglichst differenziert abbilden zu können, wurden darüber hinaus die Gebäudetiefen, also die Längenmaße der jeweils kürzeren Gebäudekanten, untersucht. Dabei wurde bei Einfamilienhäusern eine durchschnittliche Gebäudetiefe von rund 10,5 Metern und bei Doppel- und Reihenhäusern von rund 12,5 Metern erhoben. Im Geschosswohnungsbau konnte von einer durchschnittlichen Gebäudetiefe von rund 13,5 Metern ausgegangen werden. Bei Punkthäusern, bei denen die Varianz der Gebäudetiefen am größten war, liegt die durchschnittliche Gebäudetiefe bei rund 18 Metern (Abbildung 28).

Abbildung 27:

Systematik der Kombination von Siedlungssegmenten zu idealtypischen Siedlungen mit drei unterschiedlichen Erschließungstypen

**Abbildung 28:**

Erhobene Gebäudetiefen nach Gebäudetypen

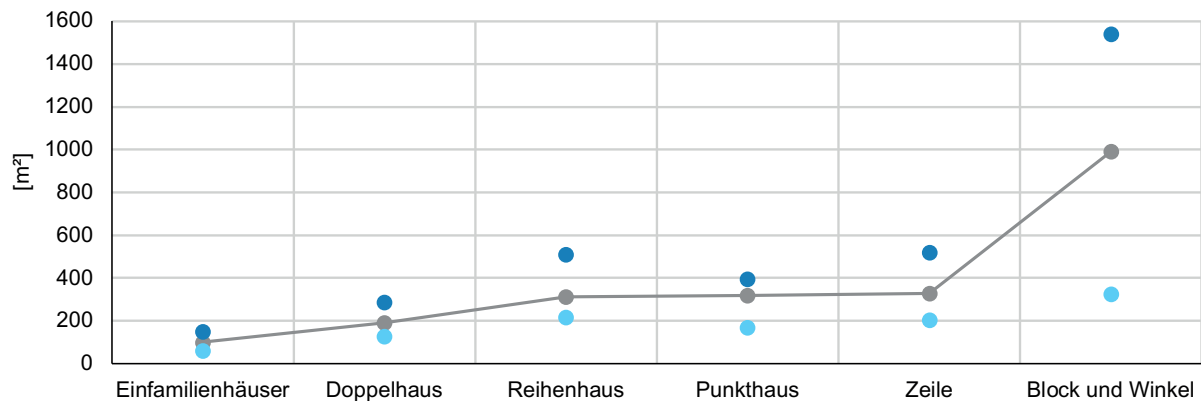


Die Maße der jeweils längeren Gebäudekanten wurden so modelliert, dass Grundflächen entstanden, die

1. hinsichtlich ihrer Größe innerhalb der jeweiligen identifizierten Spannbreiten liegen (Abbildung 29) und
2. in Kombination mit der Geschossigkeit und der Anzahl der Gebäude pro Segment die jeweiligen, in der Realität vorgefundenen, Dichtegrade abbilden (Tabelle 4).

Abbildung 29:

Größe der erhobenen Gebäudegrundflächen nach Gebäudetypen



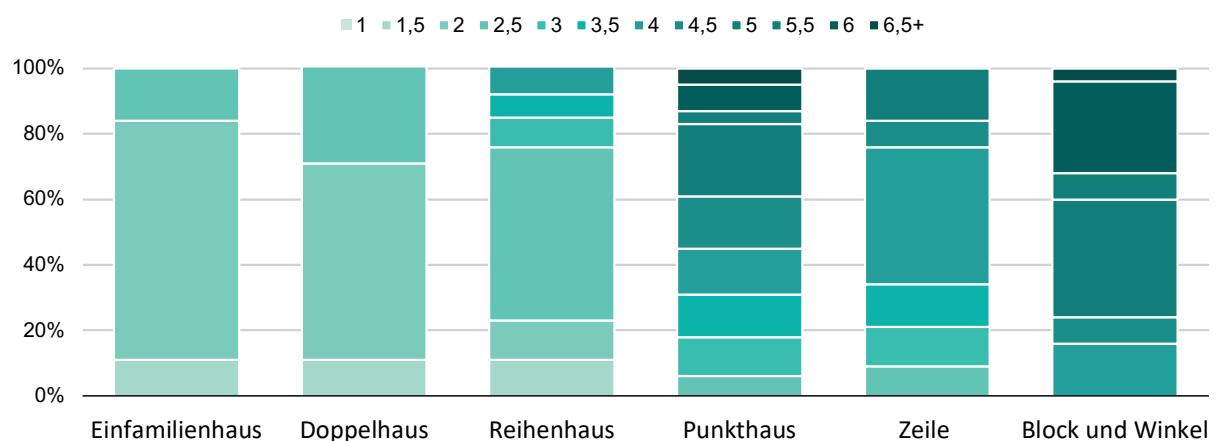
Zu oberirdischen Garagen auf privaten Grundstücken konnten keine belastbaren Kennzahlen ermittelt werden, da diese zum Großteil nicht aus dem der Untersuchung zugrunde liegenden Plan- und Bildmaterial abzuleiten waren. Diese Grundflächen wurden im Zuge der Modellierung grafisch nicht berücksichtigt, sie fließen aber als Annahme rechnerisch in die weitere Bilanzierung ein. Es wurde bei Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern von je einer Garage (15 m² Grundfläche) pro Wohneinheit ausgegangen. Weitere, der Wohnnutzung untergeordnete Gebäude, wie beispielsweise Gartenhäuser oder Carports, wurden aufgrund ihres sehr geringen Einflusses auf die Ökobilanz weder grafisch noch rechnerisch berücksichtigt.

Geschossigkeiten

Für die realitätsnahe Nachbildung der Geschossigkeiten wurden die Siedlungsbereiche hinsichtlich der Geschosse je Gebäudetyp untersucht. Sie liegt bei Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern zwischen 1,5 und 2,5, bei Punkthäusern und Zeilen zwischen 3 und 5 sowie bei Blöcken und Winkeln zwischen 4 und 6. Als halbe Geschosse werden solche Flächen geführt, die zu Wohnzwecken genutzt werden können, deren Grundfläche aber geringer als 75 % der Grundfläche der darunterliegenden Etage ist. Bei den kleineren Gebäudetypen Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser ist dies in der Regel bei Dachgeschossen der Fall, bei den größeren Gebäudetypen bei Staffelgeschossen. Bei der Modellierung blieben - analog zur Modellierung der Dichtegrade - Geschossigkeiten unberücksichtigt, die bei weniger als 10 % der untersuchten Gebäude innerhalb der Siedlungsbereiche vorzufinden waren (Abbildung 30).

Abbildung 30:

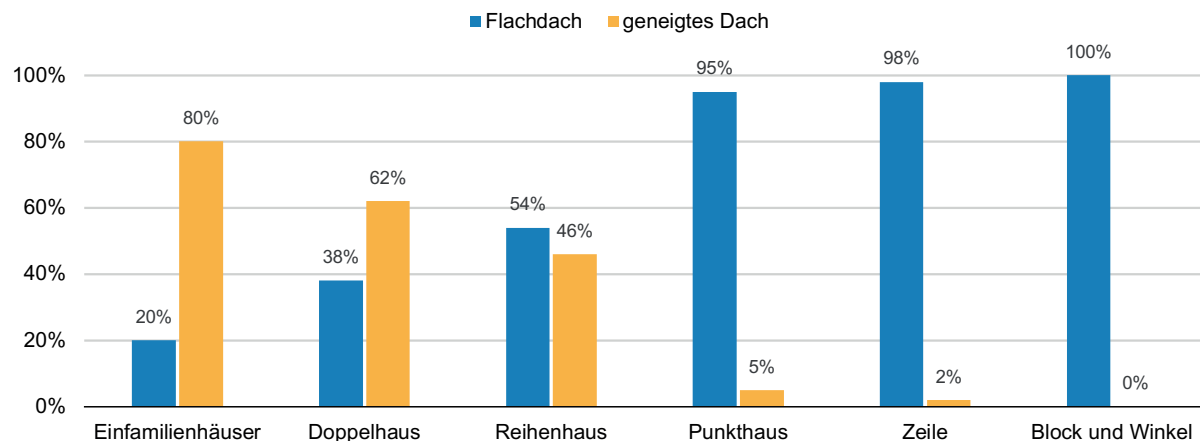
Erhobene Geschossigkeiten nach Gebäudetypen



Dachformen

Als Dachform (Flachdach oder geneigte Dachflächen) wurde jeweils die in der Praxis pro Gebäudetyp dominante gewählt. Geneigte Dachflächen wurden zur Vereinfachung als Satteldächer ausgebildet. Auf Basis der Erhebung wurden Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser mit geneigten Dachflächen modelliert und die Geschosswohnungsbauten mit Flachdächern (Abbildung 31).

Abbildung 31:
Erhobene Dachformen nach Gebäudetypen



Unterirdische Flächen

Ebenso wie für die Flächen von oberirdischen Garagen, konnten auch für Tiefgaragen- und Kellerflächen im Zuge der Analyse der Siedlungsbereiche keine belastbaren Kennzahlen erhoben werden. Sie blieben daher bei der grafischen Darstellung der Segmente unberücksichtigt. Die Flächenwerte fließen allerdings auch hier rechnerisch als Pauschalwerte in die weitere Bilanzierung ein. Bei Geschosswohnungsbauten wurde angenommen, dass jede Wohneinheit eine Kellerfläche von 12 m² beansprucht und sie zudem über Tiefgaragenflächen verfügen. Die Bemessung der Größe der Tiefgaragen erfolgte über die Anzahl der Wohneinheiten mit einem Schlüssel von einem Stellplatz je Wohneinheit (Anzahl WE* 30 m² pro Stellplatz).

Bei kleineren Gebäudetypen (Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäuser) wurde von einer Unterkellerung der Hälfte der Grundflächen ausgegangen. Sie verfügen nicht über Tiefgaragen. Auswirkungen, die geringere oder größere unterirdische Flächen auf die Ökobilanz von Siedlungen haben, wurden in Kapitel 7.2 untersucht. Eine beispielhafte Tiefgarage wurde nach einem Datensatz der Passivhausdatenbank in eLCA nachgebaut, um entsprechende GWP-Werte zu ermitteln (Vukadinovic 2017). Alle für die Modellierung relevanten Flächenannahmen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

5.2.2 Erschließungstypen und deren Verkehrsflächen

Die Verkehrsflächen wurden innerhalb der Segmente so ausgebildet und angeordnet, dass sie sich durch die Addition mehrerer Segmente jeweils zu einem der drei Erschließungstypen (Sackgassen-, Schlaufen- und Gittertyp) zusammensetzen lassen. Um dies zu gewährleisten, wurden Segmente mit einer Kreuzung, einer Kurve sowie mit einem Wendehammer entwickelt (siehe Abbildung 27).

Bei der Modellierung der Verkehrsfläche wurde, aufgrund der so gegebenen Vergleichbarkeit, pauschal von einem einheitlichen Straßenquerschnitt ausgegangen. Dabei handelt es sich um eine in beiden Fahrtrichtungen befahrbare Straße mit einer Fahrbahnbreite von sechs Metern, zuzüglich beidseitigen, zwei Meter breiten

Tabelle 2:
Übersicht Flächenwerte und Geschossigkeiten nach Gebäudetypen

Gebäudetyp	Grundfläche	Geschossigkeit	Fassadenfläche	Dachfläche
Einfamilienhaus	97,7 m ²	1,5 - 2,5	160,5 - 279,4 m ²	110,9 - 135,7 m ²
Doppelhaus	190 m ²	1,5 - 2,5	231 - 392,2 m ²	206,7 - 246,8 m ²
Reihenhaus	380 m ² (kurz) 665 m ² (lang)	1,5 - 2,5	276,6 - 853,2 m ²	370,2 - 863,2 m ²
Zeile	418 m ² (kurz) 1.040 m ² (lang)	3 - 5	801 - 2.715 m ²	419 - 1.040 m ²
Punkthaus	324 m ²	3 - 5	648 - 1.080 m ²	324 m ²
Block & Winkel	3.537 m ² 1.040 m ² (Zeile)	4 - 6	2.174 - 9.432 m ²	1.040 - 3.537 m ²

Parkstreifen sowie 2,5 Meter breiten Fußwegen. Die Anzahl der straßenbegleitenden öffentlichen Stellplätze ist somit nicht von der Anzahl der Wohneinheiten abhängig, sondern von den jeweiligen Straßenlängen der unterschiedlichen Erschließungstypen. Alternativ können die Parkstreifen auch Fahrradwege entsprechender Breite abbilden.

Effekte, die geringere oder breitere Straßenquerschnitte auf die Ökobilanz einer Siedlung haben, wurden rechnerisch berücksichtigt (siehe Kapitel 7.2). Das zeichnerisch dargestellte Straßenprofil orientiert sich an den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen RAS 06 (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. 2006) und ist so gewählt, dass das Verhältnis von Verkehrsfläche zur Gesamtfläche der Segmente im Mittel dem der analysierten Siedlungsbereiche entspricht (Tabelle 3).

Tabelle 3:
Übersicht Straßenlänge und Verkehrsfläche nach Erschließungstyp auf Siedlungsebene (6 ha)

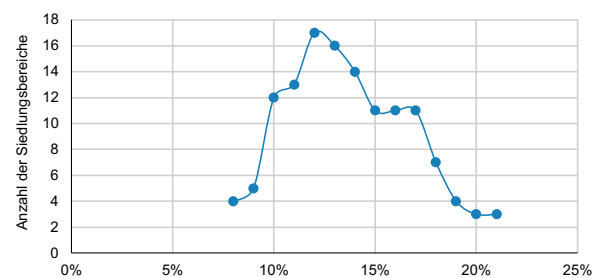
Erschließungstyp	Straßenlänge	Verkehrsfläche inkl. Rad- und Fußwegen und öffentlichen Stellplätzen (straßenbegleitend)
Sackgassenerschließung	760 m	11.500 m ²
Schlaufenerschließung	800 m	11.550 m ²
Gittererschließung	1.200 m	16.650 m ²

Das Verhältnis von Verkehrsfläche, inklusive Parkstreifen und Fußwegen, zur Gesamtfläche (ein Hektar) variiert dabei, je nachdem, ob es sich um ein Kreuzungs-, Kurven- oder Wendehammersegment handelt, zwischen 12 % und 16 % und liegt im Durchschnitt bei 13,5 %. Dies stellt auch den Durchschnittswert innerhalb der analysierten Siedlungsbereiche dar (Abbildung 32).

Die Werte beziehen sich hierbei auf die Betrachtung eines (bebauten) Siedlungssegments. Der Verkehrsflächenanteil ist vorliegend somit etwas höher als bei der in der Planungspraxis sonst üblichen Betrachtung, bei der sich der Anteil der Verkehrsfläche auf die gesamte Siedlungsfläche, inklusive außerhalb von Baufeldern gelegenen Grün- und Freiflächen, bezieht. Weitere Freiraumelemente wie Platzgestaltungen, Spiel- und Sportplätze wurden in der Modellierung und Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Abbildung 32:

Anteil der erhobenen Verkehrsflächen an der Gesamtfläche (in Prozent) nach Häufigkeit

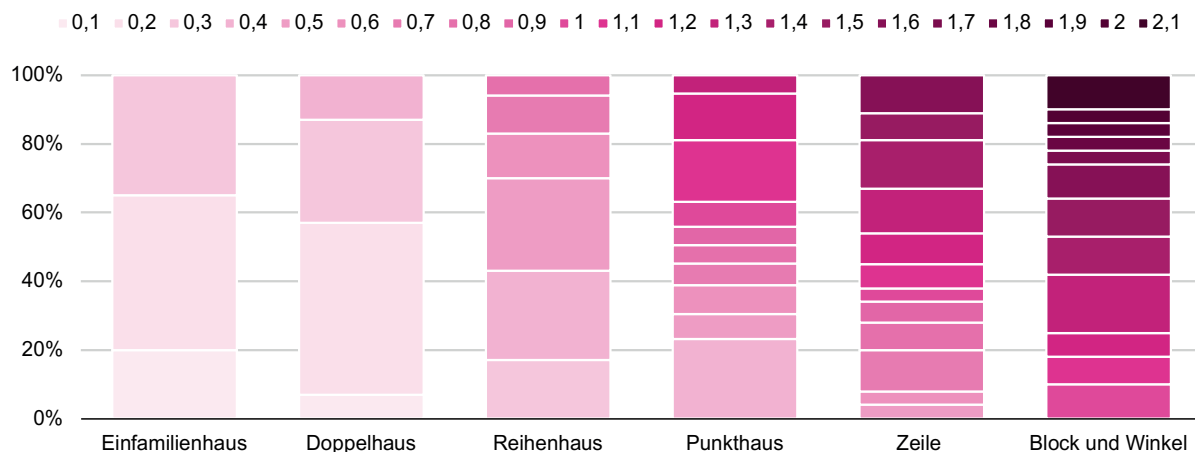


5.2.3 Bauliche Dichten

Um die Bandbreite der in der Praxis vorzufindenden Dichtegrade (Quartiers-GFZs) differenziert abbilden zu können, wurden anhand der Auswertung der Daten zu den Siedlungsbereichen je drei unterschiedliche Segmente pro Gebäude- und Erschließungstyp modelliert: Je ein Segment geringerer Dichte, ein Segment mittlerer Dichte sowie ein Segment höherer Dichte (Abbildung 33).

Abbildung 33:

Erhobene Quartiers-GFZs nach Gebäudetypen



Bei den Einfamilienhaussegmenten liegen die modellierten Quartiers-GFZs entsprechend der im Siedlungsbau vorgefundenen Dichten zwischen 0,1 und 0,3, bei Doppelhäusern zwischen 0,2 und 0,4 und bei Reihenhäusern zwischen 0,3 und 0,7. Im Geschosswohnungsbau ist die Bandbreite der abgeleiteten Dichtegrade größer. So liegt diese bei Punkthäusern zwischen 0,4 und 1,3, bei Zeilenbauten zwischen 0,7 und 1,6 und bei Blöcken und Winkeln zwischen 1,0 und 2,1 (siehe Tabelle 4). Bei der Festlegung der Bandbreiten der modellierten Dichten wurden Quartiers-GFZs außer Acht gelassen, die bei weniger als 10% der untersuchten Siedlungsbereiche vorzufinden waren.

Tabelle 4:

Übersicht zu den Siedlungsdichten innerhalb der gebildeten Segmente. Bandbreiten innerhalb der Dichtegruppen stehen in Abhängigkeit zum Erschließungstyp

Gebäudetyp	Geringe Dichte		Mittlere Dichte		Hohe Dichte	
	Quartiers-GRZ	Quartiers-GFZ	Quartiers-GRZ	Quartiers-GFZ	Quartiers-GRZ	Quartiers-GFZ
Einfamilienhaus	0,09 - 0,1	0,13 - 0,16	0,09 - 0,14	0,17 - 0,25	0,1 - 0,16	0,23 - 0,33
Doppelhaus	0,11 - 0,13	0,2	0,11 - 0,18	0,2 - 0,3	0,13 - 0,2	0,3 - 0,5
Reihenhaus	0,18 - 0,24	0,3	0,18 - 0,27	0,3 - 0,5	0,19 - 0,28	0,4 - 0,6
Punkthaus	0,13	0,4	0,13 - 0,19	0,6 - 0,8	0,16 - 0,26	0,8 - 1,3
Zeilenhaus	0,16 - 0,21	0,5 - 0,6	0,18 - 0,29	0,7 - 1,2	0,18 - 0,29	0,9 - 1,5
Block & Winkel	0,19 - 0,35	0,8 - 1,4	0,13 - 0,35	1,0 - 1,8	0,19 - 0,35	1,2 - 2,1

Wohnungsgrößen und Belegungsdichte

Die Wohnungsgrößen sind für die Ableitung der Anzahl der Wohneinheiten pro Segment aus den erzeugten Geschossflächen von Bedeutung, beruhen auf statistischen Erhebungen (Statistisches Bundesamt 2021) und unterscheiden sich je nach Gebäudetyp. Die Anzahl der erzeugten Wohneinheiten hat u. a. Einfluss auf die Anzahl der privaten Stellplätze (hier: ein Stellplatz pro Wohneinheit) sowie auf die den Wohneinheiten zugeordneten Kellerflächen (hier: 12 m² Kellerfläche pro Wohneinheit im Geschosswohnungsbau; bei Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern hingegen steht die Kellerfläche im Zusammenhang mit den Gebäudegrundflächen). Als Bezugsgröße für das erzeugte GWP einer Siedlung ist zudem die Belegungsdichte (Wohnflächeninanspruchnahme pro Person) von Relevanz. Sie unterscheidet sich je nach Gebäudetyp um bis zu 20 % (siehe Wegner et al. 2024).

Tabelle 5:

Übersicht zu den für die Modellierung gewählten Wohnungsgrößen und Belegungsdichten

Gebäudetyp	Nettowohnfläche pro Wohneinheit (m ²)	Belegungsdichte (m ² Nettowohnfläche pro Kopf)	Bewohnende pro Wohneinheit
Einfamilienhaus	157	51	3,1
Doppelhaus	152	47	3,2
Reihenhaus	152	47	3,2
Punkthaus	78	41	1,9
Zeilenhaus	78	41	1,9
Block & Winkel	78	41	1,9

5.2.4 Ergebnis Siedlungssegment

Es wurden zu jedem der sechs Gebäudetypen je neun differenzierte Siedlungssegmente modelliert, jeweils drei unterschiedliche Dichtegrade in Kombination mit drei unterschiedlichen Erschließungssegmenten (Abbildung 34). Auf diese Weise wurden insgesamt 54 verschiedene Segmente entwickelt (Abbildung 35).

Abbildung 34:

Exemplarisches Datenblatt zu einem Siedlungssegmenten mit Siedlungskennwerten

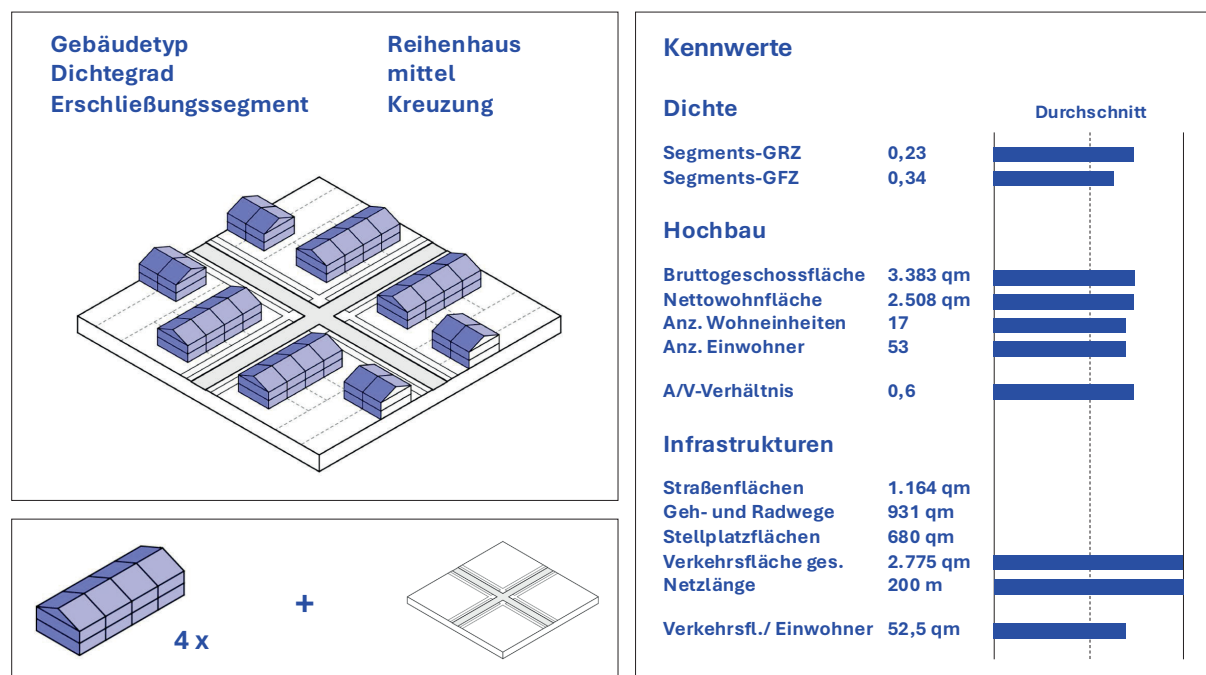


Abbildung 35:

Matrix Siedlungssegmente: Übersicht zu den 54 Siedlungssegmenten

Erschließungs-segment Gebäudetyp	Dichte-typ	Segmente mit Wendehammer			Segmente mit Kurven			Segmente mit Kreuzungen		
		geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte
Einfamilienhaus										
Doppelhaus										
Reihenhaus										
Punkthaus										
Zeile										
Block & Winkel										

5.3 Modellierung von idealtypischen Siedlungen

Durch die Addition von mehreren Siedlungssegmenten mit unterschiedlichen Erschließungsformen aber jeweils gleichem Gebäudetyp und Dichtegrad, konnten idealtypische Siedlungen modelliert werden. Unter idealtypischen Siedlungen sind solche Siedlungsstrukturen zu verstehen, die durch einheitliche Strukturmerkmale charakterisiert werden. Ein Beispiel dafür ist eine Siedlung, die ausschließlich aus Einfamilienhäusern, einer geringen Dichte und einer Sackgassenerschließung besteht. Durch die systematische Kombination dieser Strukturmerkmale (6 Gebäudetypen, 3 Dichtegrade, 3 Erschließungstypen) konnten insgesamt 54 idealtypische Siedlungen generiert werden, deren städtebaulichen und ökologischen Kennwerte erfasst und miteinander verglichen werden konnten (Abbildung 36). Da die Strukturmerkmale nicht variieren oder in Mischformen auftreten - wie es bei den meisten realen Siedlungen der Fall ist - kann durch die idealtypischen Siedlungen veranschaulicht werden, wie sich bestimmter Strukturmerkmale auf die Ökobilanz einer Siedlung auswirken.

Die Modellierung der idealtypischen Siedlungen erfolgte durch die Kombination von jeweils 6 Siedlungssegmenten. Je nach Kombination der drei unterschiedlichen Erschließungssegmente (Kreuzung, Kurve, Wendehammer) war es möglich, die drei in der Praxis vorgefundenen Erschließungstypen (Schlaufen-, Sackgassen- oder Gittererschließung) nachzubilden.

Neben den idealtypischen Siedlungen lassen sich durch die Verbindung unterschiedlicher Siedlungssegmente auch natürliche Siedlungen synthetisieren (synthetische Realsiedlungen). Hierbei können Segmente mit unterschiedlichen Gebäude- und Erschließungstypen sowie Dichtegraden miteinander in beliebiger Anzahl kombiniert und ausgewertet werden (siehe Kapitel 8).

Abbildung 36:

Matrix Siedlungstypen: Übersicht über die 54 idealtypischen Siedlungen

Erschließungs- typ	Sackgassenerschließung			Schlaufenerschließung			Rastererschließung		
	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte
Einfamilienhaus									
	Q.-GFZ 0,1 39 WE	Q.-GFZ 0,2 56 WE	Q.-GFZ 0,3 75 WE	Q.-GFZ 0,1 39 WE	Q.-GFZ 0,2 60 WE	Q.-GFZ 0,3 80 WE	Q.-GFZ 0,2 45 WE	Q.-GFZ 0,3 72 WE	Q.-GFZ 0,3 90 WE
Doppelhaus									
	Q.-GFZ 0,2 48 WE	Q.-GFZ 0,2 72 WE	Q.-GFZ 0,3 90 WE	Q.-GFZ 0,1 15 WE	Q.-GFZ 0,2 54 WE	Q.-GFZ 0,3 88 WE	Q.-GFZ 0,2 54 WE	Q.-GFZ 0,3 96 WE	Q.-GFZ 0,4 120 WE
Reihenhaus									
	Q.-GFZ 0,3 81 WE	Q.-GFZ 0,4 112 WE	Q.-GFZ 0,6 160 WE	Q.-GFZ 0,3 84 WE	Q.-GFZ 0,4 124 WE	Q.-GFZ 0,6 175 WE	Q.-GFZ 0,3 99 WE	Q.-GFZ 0,5 104 WE	Q.-GFZ 0,7 210 WE
Punkthaus									
	Q.-GFZ 0,4 194 WE	Q.-GFZ 0,7 346 WE	Q.-GFZ 1,0 496 WE	Q.-GFZ 0,4 194 WE	Q.-GFZ 0,7 346 WE	Q.-GFZ 1,1 540 WE	Q.-GFZ 0,4 194 WE	Q.-GFZ 0,5 393 WE	Q.-GFZ 1,3 648 WE
Zeile									
	Q.-GFZ 0,7 323 WE	Q.-GFZ 1,0 503 WE	Q.-GFZ 1,3 629 WE	Q.-GFZ 0,5 270 WE	Q.-GFZ 0,9 467 WE	Q.-GFZ 1,2 584 WE	Q.-GFZ 0,7 323 WE	Q.-GFZ 1,3 647 WE	Q.-GFZ 1,6 809 WE
Block & Winkel									
	Q.-GFZ 1,0 495 WE	Q.-GFZ 1,3 650 WE	Q.-GFZ 1,6 780 WE	Q.-GFZ 0,9 458 WE	Q.-GFZ 1,2 620 WE	Q.-GFZ 1,5 744 WE	Q.-GFZ 1,3 632 WE	Q.-GFZ 1,8 884 WE	Q.-GFZ 2,1 1.061 WE

Quartiersdichten (Quartiers-GFZ)

	0,1		0,7		1,3		1,9
	0,2		0,8		1,4		2,0
	0,3		0,9		1,5		2,1
	0,4		1,0		1,6		
	0,5		1,1		1,7		
	0,6		1,2		1,8		

6. Ökobilanzierung der Gebäude- und Siedlungsstrukturen

In diesem Kapitel sind die der Modellierung zugrunde liegenden Vorannahmen dargelegt. Zunächst erfolgt eine kurze Beschreibung der methodischen Grundlagen zur Ökobilanzierung sowie die Definitionen der betrachteten Lebenszyklusphasen, der funktionalen Einheit sowie der Systemgrenzen des Modells. Anschließend sind die Berechnungsverfahren zur Flächenermittlung und die Annahmen für die jeweiligen Konstruktionselemente oder technischen Anlagen dargestellt. Alle weiterführenden, detaillierten Angaben sind im Anhang dokumentiert.

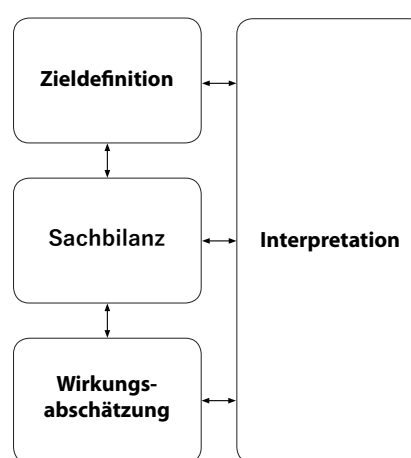
6.1 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanzierung

Das Forschungsprojekt hatte das Ziel, mit der Methode der Ökobilanzierung die Treibhausgasemissionen (GWP in kg CO₂ eq) von Neubausiedlungen zu ermitteln, die über einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren resultieren. Die Durchführung von Lebenszyklusanalysen ist mit ISO 14040:2006/Amd 1:2020 und ISO 14044:2006/Amd 2:2020 international standardisiert und erfolgt in vier Phasen, welche im Folgenden in Bezug auf das Q-LCA-Modell erläutert werden (Abbildung 37):

1. Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen,
2. Erstellung einer Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung und
4. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.

Abbildung 37:

Die vier Schritte einer Lebenszyklusanalyse



6.1.1 Lebenszyklusphasen

Um die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen zu gewährleisten, ist es laut ISO-Standard DIN EN 15804 und DIN EN 15978 wichtig, die Systemgrenzen der Betrachtung zu definieren, die den Übergang von Stoffen zwischen der Technosphäre und der Umwelt festlegen. Im Bauwesen werden hierfür vier Teilsysteme untersucht, die nach Herstellungs- und Errichtungsphase (A), Nutzungsphase (B), Entsorgungsphase (C) und ggf. Gutschriften und Belastungen (D) unterschieden und in weitere Teilsystemen untergliedert sind (Abbildung 38).

Abbildung 38:

Lebenszyklusphasen eines Gebäudes nach DIN EN 15804

Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase					Entsorgungsphase				Vorteile & Belastungen außerhalb der Systemgrenze
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Bau / Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Umbau / Erneuerung	Abbruch	Transport	Abfallbehandlung	Deponierung	Wiederverwendung, Rückgewinnung, Recyclingpotential
					B6 Betrieblicher Energieeinsatz									
					B7 Betrieblicher Wassereinsatz									

Recyclingmöglichkeiten der ausgebauten Materialien können in Form von Gutschriften in der Phase D der Bilanzierung berücksichtigt werden (Dollhopf 2022). Mögliche Indikatoren für eine Kreislaufwirtschaft wurden bereits in verschiedenen Studien vorgeschlagen zum Beispiel: Reduzierter Verbrauch natürlicher Ressourcen, erhöhter Anteil recyclebarer und erneuerbarer Ressourcen, reduzierte Emissionen, verringerte Materialverluste und gesteigerte Produktlebensdauer (Dräger et al. 2022). Allerdings enthalten viele Datensätze unvollständige oder unzuverlässige Werte für die Phase D. Für die Berechnungen im Forschungsprojekt mit eLCA wurden nur die Phasen A1 bis A3 sowie C3 und C4 betrachtet. Die Phasen A4 und A5 wurden nur für den Erdaushub (separat) ermittelt, blieben aber in der Bilanzierung ansonsten unberücksichtigt. Phase D wurde ebenfalls nicht betrachtet, was in anderen Ökobilanzen insbesondere bei Holzbaukonstruktionen aufgrund möglicher Gutschriften durch Wiederverwendung und Recycling von Konstruktionselementen zu abweichenden Ergebnissen führt.

6.1.2 Funktionale Einheit

Die funktionale Einheit beschreibt die zentrale Bezugsgröße, auf die sich die Ökobilanz bezieht, d.h. den quantifizierbaren Nutzen eines Produktsystems oder einer Dienstleistung. Bei Gebäudeökobilanzen sind das typischerweise 1 m³ Baumaterial, 1 m² beheizte Wohnfläche, 1 Gebäudenutzer oder 1 Bürogebäude etc. Die errechneten Ergebnisse der Ökobilanz beziehen sich auf diese Einheit (WECOBIS o.J.). In Gebäudeökobilanzen werden u. a. folgende zentralen Umweltindikatoren erhoben:

- Treibhauspotenzial (GWP) in [kg CO₂ eq]
- Ozonabbaupotenzial (ODP) in [kg R11 eq]
- Versauerungspotenzial (AP) in [kg SO₂ eq]
- Eutrophierungspotenzial (EP) in [kg PO₄ eq]
- Bodennahe Ozonbildung (POCP) in [kg C₂H₄ eq]

Im Hinblick auf die gesellschaftlich in Deutschland angestrebten und politisch verankerten Klimaschutzziele wurde für diese Studie festgelegt, dass sich die Umweltbewertung der nachfolgend analysierten Siedlungsstrukturen auf die Erhebung und Auswertung des GWP beschränkt. Als zentrale Indikatoren werden das GWP pro Nettoraumfläche (GWP/m² NRF) und pro Bewohner oder Bewohnerin (GWP/Person) verwendet, jeweils für eine 6 ha große Siedlungsfläche. Die Kennwerte zu den weiteren Wirkungskategorien könnten ebenfalls ausgewertet werden, da sie in der Datenerhebung in eLCA mit erhoben wurden. Sie können bedarfsweise in das entwickelte Excel-Rechenblatt eingearbeitet werden. Zur Berechnung der Umweltwirkungen diente die ÖKOBAUDAT-Datenbank, Version OBD_2023_I_A2

6.1.3 Untersuchungsrahmen und räumliche Bilanzgrenze

Wie in Kapitel 3 dargestellt, betrachtet das Q-LCA-Modell vier baulich-technische Subsysteme (Gebäude, Tiefgarage, Straßen und Stellplätze sowie Versorgungsleitungen für Raumwärme, Warmwasser, Haushaltsstrom, Wasserversorgung und Abwasserentsorgung), die in verschiedenen Ausprägungen für eine Siedlungsfläche von 6 ha bilanziert wurden. Die vertikale Systemgrenze bildet der Sohlenbereich der am tiefsten eingebauten Leitung. In der Bilanz wurden die siedlungsinternen Leitungen an das übergeordnete Versorgungsnetz und die Hausanschlussleitungen berücksichtigt. Verbindungsleitungen und Anlagen für den Anschluss an die zentralen Netze zur Siedlungsversorgung wurden häufig nicht in die Betrachtung eingeschlossen. Hierzu zählen zum Beispiel Transformatorstationen oder Vermittlungsanlagen der Kommunikationsleitungen. Transporte zum Einbauort wurden mit einer Transportentfernung von 30 km bei einem Straßentransport mit LKW berücksichtigt (Schuchardt 2006).

6.1.4 Zeitliche Bilanzgrenze

Die Nutzungsdauer von Gebäuden bewegt sich in der Regel zwischen 30 und 100 Jahren. Für Ökobilanzen im Bausektor wird als zeitliche Bilanzgrenze daher zumeist eine Nutzungsdauer von 50 Jahren zugrunde gelegt (Dollhopf 2021, 2022; Lang/Schneider 2017). Auch für eine Gebäudezertifizierung nach DGNB oder BNB wird üblicherweise eine Nutzungsdauer von 50 Jahren festgelegt (DGNB 2018). Diverse Studien sind dagegen der Meinung, dass ein statischer Betrachtungszeitraum zu einem defizitären Ergebnis führt und daher verschiedene Zeiträume betrachtet werden müssen oder ein dynamischer Datensatz zum Einsatz kommen sollte (König 2017; Sohn et al. 2020).

Auch die temporale Dynamik des GWP innerhalb von Lebenszyklen wird in bisherigen Analysen häufig ignoriert (Sohn et al. 2020). Aufgrund der Langlebigkeit der bilanzierten Güter sollte nämlich idealerweise eine zeitliche Auflösung unter Berücksichtigung einer dynamischen Betrachtung des übergeordneten E-Systems vorgenommen werden, da eine lineare Fortschreibung insbesondere bei starken Veränderungen im Bereich der Strombereitstellung dem Systemverhalten nicht gerecht würde. Eine sogenannte dynamische LCA berücksichtigt, dass sich GWP-Faktoren über einen längeren Zeitraum hinweg verändern können (Sohn et al. 2020). Insbesondere im Bezug auf das Energiesystem kann eine Veränderung im Energiemix sowohl die graue Energie als auch die Betriebsenergie maßgeblich beeinflussen, wie beispielsweise durch einen erhöhten Einsatz von regenerativen Energiequellen. In Kapitel 7.3 wird dieses Thema ansatzweise diskutiert. Für die Umsetzung einer dynamischen LCA fehlt es allerdings momentan an verlässlichen Datensätzen, aus diesem Grund wurde auf einen statischen Datensatz zurückgegriffen. Zu beachten ist auch, dass in der mit eLCA verknüpften Datenbank ÖKOBAUDAT regelmäßige Updates erfolgen, die zu minimalen Unterschieden der GWP-Werte führen können.

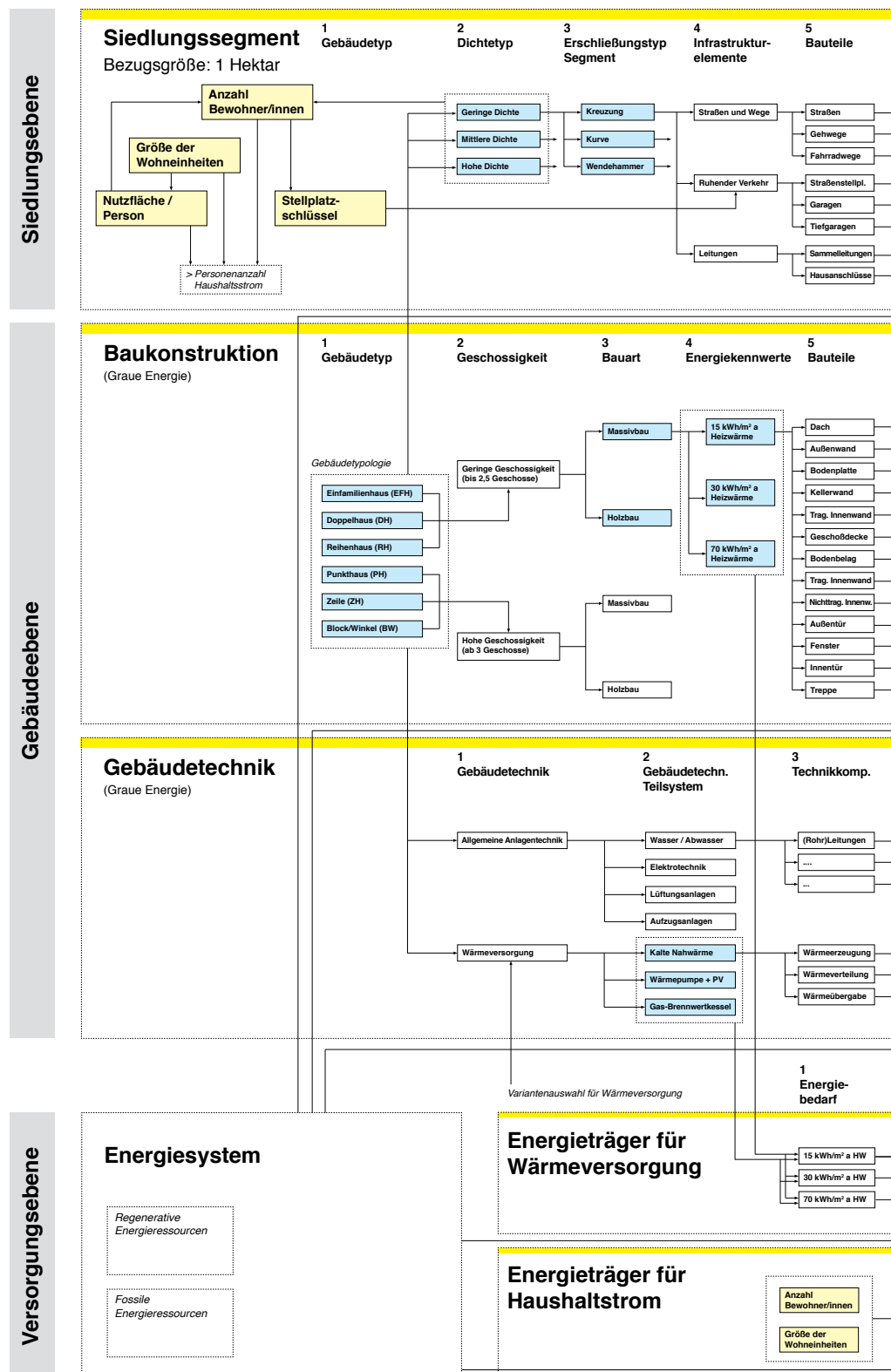
Hinsichtlich der Instandhaltung von Tiefbauelementen wird häufig davon ausgegangen, dass während der Nutzungsdauer von 50 Jahren kaum Erneuerungs- oder Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind (Dollhopf 2022). Die Nutzungsphase wird aus diesem Grund größtenteils vernachlässigt, ähnlich wie auch die Entsorgungsphase, da der Aufwand für den Abbruch von Kanälen hauptsächlich aus dem Freilegen der Bestandsleitung besteht, was den Erneuerungsarbeiten oder der Verlegung neuer Rohrleitungen zugerechnet wird (Dollhopf 2022).

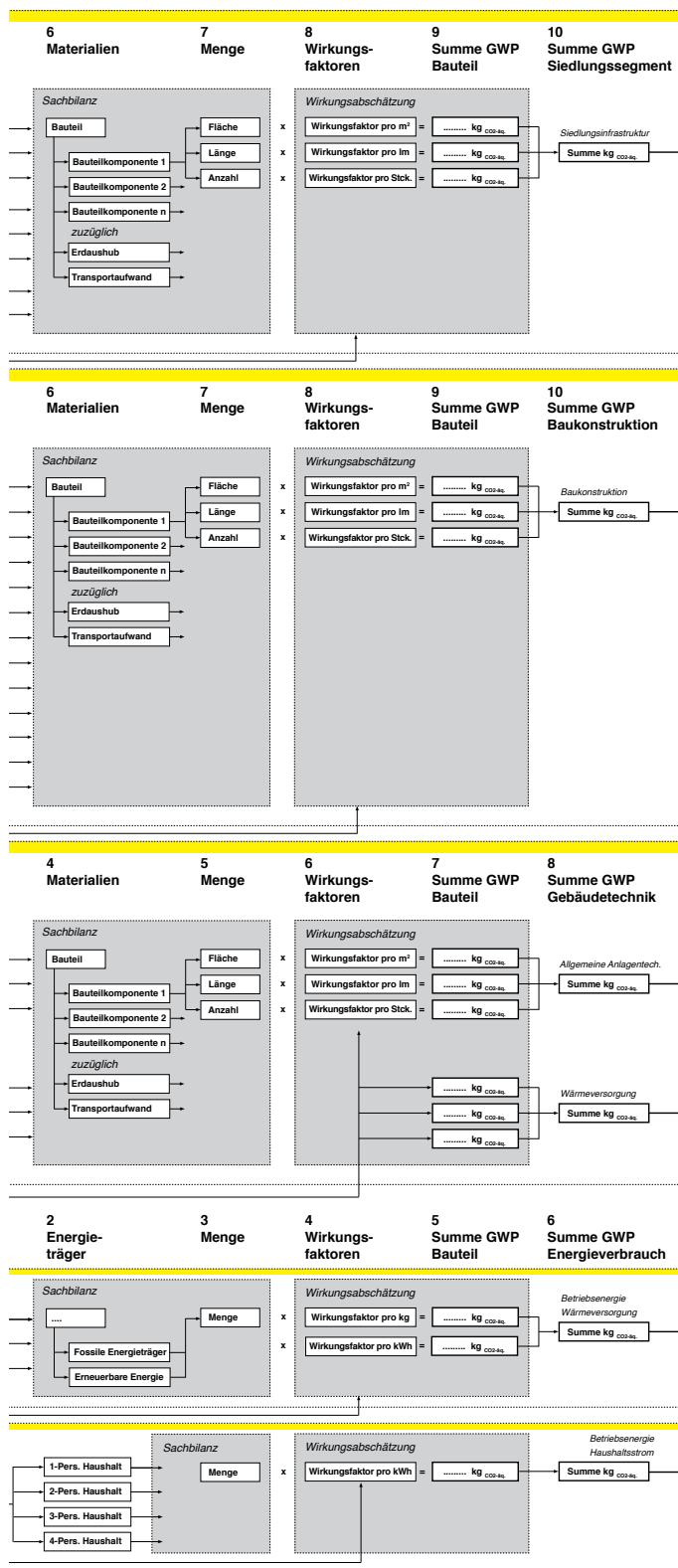
6.1.5 Sitemap Parameterverknüpfungen

Abbildung 39 gibt einen schematischen Überblick zu den Verknüpfungen der zentralen Parameter und ihrer Teilsysteme, wie sie im Bilanzierungs- und Rechenmodell konstruiert wurden. Das Diagramm zeigt, aus welchen baulich-konstruktiven oder technischen Elementen die Hauptparameter zusammengesetzt sind und wie weitere Einflussgrößen wie die Pro-Kopf-Wohnfläche oder der Stellplatzschlüssel auf das Gesamtsystem einwirken. Die in Wirklichkeit vielfältigen konstruktiven, räumlichen und funktionalen Wechselwirkungen können in dem weitgehend linearen Flussmodell nur rudimentär erfasst werden. Wichtige Quervernetzungen zwischen den Elementen sind aber angedeutet. Am Rand auf der rechten Diagrammseite ist dargestellt, wie aus der Summe der Bilanzierungen der einzelnen Elemente das GWP für die 54 Siedlungssegmente ermittelt wird, die wiederum die Grundlage der Bilanzierung der Varianten der idealtypischen Siedlungen bilden.

Abbildung 39:

Q-LCA Sitemap Parameterverknüpfung - eine diagrammatische Repräsentation der Parameterbeziehungen im Bilanzierungsmodell





Q-LCA Sitemap Parameterverknüpfung

Bilanzierung von 54 Siedlungssegmenten

Bezugsgröße: 1 Hektar

Siedlungssegment	Segmente mit Wandkern			Segmente mit Kernen			Segmente mit Kreuzungen		
	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte
Einzelhaus									
Doppelhaus									
Reihenhaus									
Reihhaus									
Zelle									
Block & Winkel									

Bildung von idealtypischen synthetischen Siedlungen

durch Kombination von aus jeweils
6 Siedlungssegmenten mit Varianten aus
-> 6 Gebäudetypen
-> 3 Erschließungstypen auf Siedlungsebene
-> 3 Dichtegrade

Segment 1	Segment 3 (Kreuzung)	Segment 5
Segment 2	Segment 4 (Kreuzung)	Segment 6

54 Idealtypische synthetische Siedlungen

Bezugsgröße: 6 Hektar

Siedlungssegment	Siedlungssegment			Siedlungssegment			Siedlungssegment		
	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte	geringe Dichte	mittlere Dichte	hohe Dichte
Einzelhaus									
Doppelhaus									
Reihenhaus									
Reihhaus									
Zelle									
Block & Winkel									

Bilanzierung von 972 Varianten

54 idealtypische Siedlungen in
Ausführungsvarianten von
-> 2 Konstruktionsweisen
-> 3 Energiekennwerten
-> 3 Wärmeversorgungsvarianten

Indikatoren:

GWP / Nettonutzfläche
[kg CO₂-Äq./m² NRF * a]

GWP / Person
[kg CO₂-Äq./EW * a]

Legende

- Zentraler Parameter im Bilanzierungsmodell
- Zusätzliche zentrale Einflussfaktoren
- Untergeordneter Teilparameter zur GWP-Ermittlung
- Sachbilanz und Wirkungsabschätzung
- Indikatoren (GWP pro Fläche oder Person)

Stand 12.04.2025

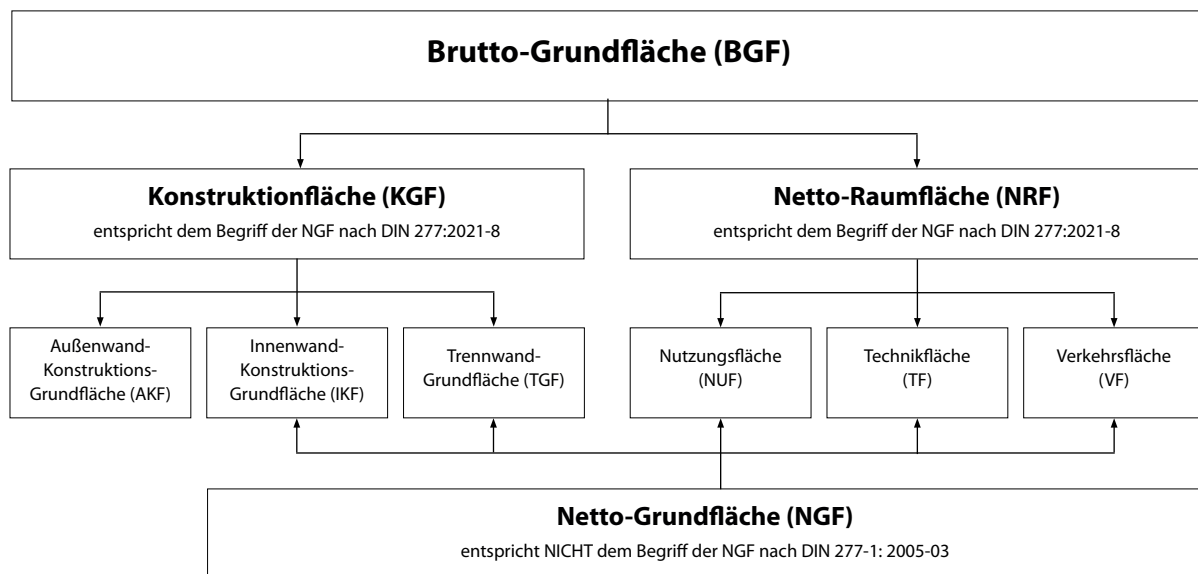
6.2 Verfahren zur Flächen- und Mengenerhebung

6.2.1 Ermittlung der Gebäudeflächen, Anzahl der Wohneinheiten und Einwohner

Ein sehr einflussreicher und daher kritischer Aspekt bei Ökobilanzierungen ist die korrekte Mengenermittlung der zu bilanzierenden Materialströme. Bei Ökobilanzen im Bauwesen wird die Systematik und Terminologie nach DIN 277 zugrunde gelegt, die ein standardisiertes und damit verbindliches Verfahren zur Flächenermittlung beschreibt (Heinkelmann/Siegmund 2016) (Abbildung 40). Nachfolgend ist kurz beschrieben, wie diese Systematik auf das im Forschungsprojekt entwickelte Rechenmodell angewendet wurde, um das Mengengerüst für die Ökobilanzierung zu ermitteln.

Abbildung 40:

Schematische Übersicht Grundflächen und Raumflächen nach DIN 277-1:2016-01 (Quelle: Heinkelmann, Siegmund 2016)



Berechnung der Brutto-Grundflächen (BGF)

Als Bezugsgrößen bei der Ermittlung des GWP einer Siedlung wurden in dieser Untersuchung das GWP pro Quadratmeter Nettoraumfläche (NRF) sowie das GWP pro Person (Person) herangezogen. Um diese Kennzahlen zu ermitteln, wurden zunächst die Brutto-Grundflächen (BGF) der Gebäude wie folgt ermittelt:

$$BGF = (\text{Gebäudegrundfläche} * \text{Anzahl der Geschosse}) + \text{Keller- und Tiefgaragenflächen}$$

Die Gebäudegrundflächen sowie die Anzahl der Geschosse wurden den modellierten Gebäuden entnommen.

Berechnung der Nettoraumfläche (NRF)

Die Nettoraumfläche ist laut aktueller DIN 277-1 ein Teil der Bruttogrundfläche, abzüglich der Konstruktionsfläche (KGF). Sie beinhaltet alle Grundflächen der nutzbaren Räume und setzt sich aus Nutzfläche (NUF), Technikfläche (TF) und Verkehrsfläche (VF) zusammen. Nicht zur NRF gehören außerdem versetzbare, nichttragende und bewegliche Trennwände (Bayerische Architektenkammer 2021).

Zur Berechnung der NRF wurde der Anteil der Konstruktionsfläche (KGF) zur BGF ermittelt und von der BGF abgezogen ($NRF = BGF - KGF$). Nach Kolbitsch et al. (2008) liegt der Anteil KGF von BGF für Mehrfamilienhäuser bei etwa 13,1 %. Nach einer BKI-Untersuchung von 220 Mehrfamilienhäusern liegt er bei 16 bis 18 % (Kalusche 2023). Für Ein-, Zweifamilien- und Reihenhäuser wurde in einer weiteren Studie ein Wert von 19-22 % ermittelt

(ages 2000: 5). Für die Berechnung der Nettoraumfläche (NRF) wurde die BGF mit dem Faktor 0,8 (bei Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern) bzw. 0,85 (bei Mehrfamilienhäusern) multipliziert:

$$\begin{aligned} NRF_{EFH, DH, RH} &= BGF * 0,8 \text{ (ages 2000: 5)} \\ NRF_{MFH} &= BGF * 0,85 \text{ (Kolbitsch et al. 2008; Kalusche 2023)} \end{aligned}$$

Für die Ökobilanzierung in eLCA bildet die NRF die Referenzgröße zur Ermittlung der flächenbezogenen GWP-Werte. Zur Berechnung der NRF bedarf es Annahmen über die Keller- und Tiefgaragenflächen. Bei den kleineren Gebäudetypen (EFH, DH, RH) wurde von 50% Unterkellerung der Gebäudegrundflächen ausgegangen, bei den Mehrfamilienhäusern (PH, ZH, BW) von 12 m² Kellerfläche pro Wohneinheit. Hinzu kommt bei den Mehrfamilienhäusern je Wohneinheit ein Tiefgaragenstellplatz, für den ein Flächenanteil von 30 m² pro Stellplatz festgelegt wurde. Dieser Wert wurde am Beispiel einer eigenen empirischen Berechnung am Beispiel der "Parklogen München-Schwabing" von prasch buken partner architekten für eine Tiefgarage mit 28 Stellplätzen ermittelt, bei der neben den eigentlichen Stellplatzflächen für die PKW auch die Zufahrtsstraßen und Rampen in der Berechnung einbezogen wurden. Bei den kleineren Gebäudetypen wurden dagegen jeweils ein Stellplatz pro Wohneinheit mit oberirdischen Garagen oder Carports angenommen.

Kellerflächen

$$\begin{aligned} \text{Kellerfläche}_{EFH, DH, RH} &= \text{Gebäudegrundfläche} * 0,5 \\ \text{Kellerfläche}_{MFH} &= \text{Anzahl WE} * 12 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Garagenflächen

$$\begin{aligned} \text{Oberirdische Garagen}_{EFH, DH, RH} &= \text{Anzahl WE} * 15 \text{ m}^2 \\ \text{Tiefgaragen}_{MFH} &= \text{Anzahl WE} * 30 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Die Kellerflächen sowie die Flächen der Tiefgaragen stehen bei Mehrfamilienhäusern in Abhängigkeit zu der Anzahl der Wohneinheiten. Um diese zu ermitteln, mussten zunächst die Wohnflächen (Wfl) berechnet werden (Bundesministerium der Justiz 2015):

Berechnung der Wohnflächen (Wfl)

$$\begin{aligned} Wfl_{EFH, DH, RH} &= BGF \text{ aller oberirdischer Geschosse} * 0,8 \\ Wfl_{MFH} &= BGF \text{ aller oberirdischer Geschosse} * 0,65 \text{ (Bundesministerium der Justiz 2015)} \end{aligned}$$

Von den Wohnflächen konnte im nächsten Schritt die zu erwartende Anzahl der Wohneinheiten ermittelt werden (Statistisches Bundesamt 2021). Das Verhältnis von Wohnflächen zu Wohneinheiten unterscheidet sich dabei je nach Gebäudetyp:

Berechnung der Anzahl der Wohneinheiten (WE)

$$\begin{aligned} WE_{EFH} &= Wfl / 157 \text{ m}^2 \\ Wfl_{DH, RH} &= Wfl / 152 \text{ m}^2 \\ WE_{MFH} &= Wfl / 78 \text{ m}^2 \text{ (Statistisches Bundesamt 2021)} \end{aligned}$$

Die Anzahl der Personen (Person) leitet sich in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls aus der Wohnfläche ab und wurde wie folgt errechnet (Wegener et al. 2024):

Berechnung der Anzahl der Einwohner (Person)

$$Person_{EFH} = Wfl / 51 \text{ m}^2$$

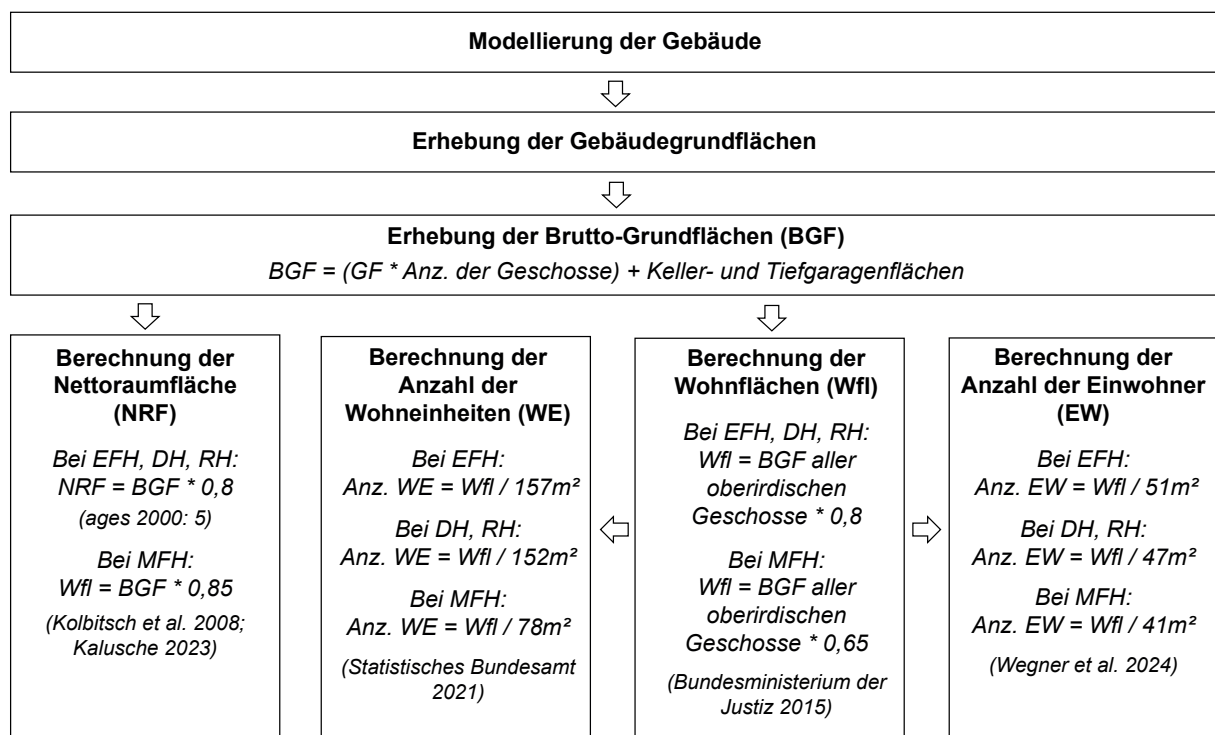
$$Person_{DH, RH} = Wfl / 47 \text{ m}^2$$

$$Person_{MFH} = Wfl / 41 \text{ m}^2$$

Die Verfahrensschritte und Ergebnisse der für das Rechenmodell relevanten Verfahren zur Flächenermittlung sind in Abbildung 41 zusammengefasst.

Abbildung 41:

Übersicht zum Verfahren für die Berechnung der Flächengrößen, Wohneinheiten und Einwohner der Siedlungssegmente



6.2.2 Ermittlung von Flächen für den ruhenden Verkehr und der technischen Siedlungsinfrastruktur

Berücksichtigung von Erdaushub und sonstigen Maschineneinsatz für Straßen und Wege

Ermittlung der GWP-Basisdaten für die funktionale Einheit "Parken":

1. Straßenbegleitender Stellplatz
2. Stellplatz überdacht (Carport aus Holz)
3. Stellplatz in privater Garage (Mauerwerk, Holz)
4. Stellplatz in Tiefgarage aus Stahlbeton (Bodenplatte + Decke + Anteil Fahrspur + Seitenwände)
5. Oberirdische Parkhäuser (Hochgaragen) wurden in der Studie nicht betrachtet.

Rohrleitungen

Verschiedene Normen und Richtlinien regeln den Rohrleitungsbau. Dazu gehören Vorgaben der zuständigen Senatsverwaltung, welche beispielsweise regeln, welche Leitungen außerhalb der Fahrbahn und welche innerhalb der Fahrbahn zu verlegen sind (DIN 1998, 2018). Kanäle und Leitungen für Gas-, Wasser- und Fernwärme befinden sich meist im Erdreich unterhalb von Straßen (Fuchs 2023).

6.3 Annahmen zur Erstellung der Sachbilanz

Für die Berechnung einer Ökobilanz müssen alle relevanten Bauteile identifiziert werden, die auf die Bilanz Einfluss nehmen. Durch Literatursauswertung vorangegangener Studien wurden bereits einige Bauteile für eine ressourcenspezifische Betrachtung von urbanen Strukturen identifiziert, wie zum Beispiel der Ressourcenverbrauch von Gebäuden, der Ressourcenverbrauch von Verkehrsanlagen, der Flächenverbrauch, bauliche Dichte, Gebäudetypologie und die Bebauungsstruktur (Weidner 2020). Zur Erstellung der Sachbilanzen mussten im Weiteren eine Vielzahl von konstruktiven und gebäudetechnischen Annahmen getroffen werden, die maßgeblich durch funktionale, technische oder ästhetische Anforderungen definiert werden: Tragfähigkeit, Energie-, Brand-, Feuchte- und Schallschutz, Haltbarkeit und Materialqualitäten. Die Anforderungen schaffen einen Kontext, der wiederum durch äußere Bedingungen wie Klimazone, Solarstrahlung, geräuschintensive Umgebung beeinflusst wird. Zugleich bestehen innere Anforderungen wie Behaglichkeit, Fensterflächenanteil oder Orientierung nach Himmelsrichtungen (z.B. für Besonnung). Die Sachbilanz einer Siedlung beinhaltet die Kostengruppen 300 bis 500 sowie die Nutzungsphase (B6), welche im Folgenden näher erläutert werden. Alle detaillierten Annahmen zu den gewählten Konstruktionsweisen sowie den siedlungs- und gebäudetechnischen Anlagen, die zur Ermittlung der Elementarflüsse in der Ökobilanz erforderlich waren, sind im Anhang ausführlich dokumentiert.

6.3.1 Konstruktive Bauteile und Erdaushub (KG 300 sowie KG 510)

Die Kostengruppe 300 umfasst alle jene Bauteile, welche die Konstruktion ausmachen. Hier wurde insbesondere bei den für das Tragwerk relevanten Konstruktionen (tragende Wände, Decken und Dächer) zwischen mineralischer und Holzbauweise unterschieden.

Erdaushub (KG 310 und KG 510)

Für den Erdaushub wurden drei verschiedene Kategorien angenommen: Erdaushub für Keller, Erdaushub für Leitungen und Erdaushub für Garagen. Der Erdaushub für Leitungen und Garagen wird der Kostengruppe 500 zugeordnet, während der Erdaushub für die Keller der Kostengruppe 300 zugeschlagen wird. Für den Erdaushub der Leitungen wurde angenommen, dass der Aushub vor Ort verbleibt und zu 100 % wieder verfüllt wird. Für die Garagen und Keller wurde angenommen, dass nur 10 % des Aushubs auf dem Grundstück verbleiben und wieder verfüllt und 90 % des Aushubs abtransportiert werden. Während bei Tiefgaragen das ganze Volumen der Garage (bis zu einer Tiefe von 3,00 m) ausgehoben werden muss, ist unter den Hochgaragen nur ein 30 cm tiefer Aushub nötig. Für die Leitungen wurde lediglich ein Graben für alle zu verlegenden Leitungen pro Straße angenommen mit einer Aushubtiefe von 1,50 m.

Der Hauptanteil des GWP wird nicht durch den Aushub an sich emittiert, sondern durch den Abtransport dessen zu Deponien oder anderen Baustellen (vgl. Fuchs 2023: 54). Jeder abtransportierte Kubikmeter Erdaushub emittiert $0,14 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3 \cdot \text{a}$, während der Aushub an sich davon nur 20 % einnimmt ($0,028 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3 \cdot \text{a}$, siehe Tabelle 6). Für die Transportstrecke wurden 30 km angenommen.

Ökobilanziell ist die Betrachtung des Erdaushubs interessant, da dieser den Lebenszyklusphasen A4 bzw. A5 zugerechnet wird. Diese Lebenszyklusphasen werden jedoch bei allen anderen Bauteilen nicht mitbetrachtet, da sie in der genutzten Bilanz-Software eLCA nicht bilanziert werden. In der Bilanzierung der Lebenszyklusphasen A4 und A5 liegt ein großer Forschungsbedarf - auch für die gängigen Bilanz-Softwares wie zum Beispiel eLCA. In die Bilanzierung wurde der Erdaushub mit einbezogen, da der Einfluss des ruhenden Verkehrs auf die Ökobilanz einer Siedlung untersucht werden sollte und hier Tiefgaragen und der damit einhergehende Erdaushub eine zentrale Rolle spielen. In den Berechnungen wurden für den Erdaushub mit Verbleib vor Ort $0,028 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3 \cdot \text{a}$ angenommen, für den Erdaushub mit Abtransport $0,14 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^3 \cdot \text{a}$ (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6:Überblick zum GWP für Erdaushub aus verschiedenen Literaturquellen in [kg CO₂ eq/m³*a]

Quelle	Erdaushub mit Verbleib vor Ort [kg CO ₂ eq/m ³ *a] anteilig auf 50 Jahre	Erdaushub mit Abtransport (30 km) [kg CO ₂ eq/m ³ *a] anteilig auf 50 Jahre
ÖKOBAUDAT 2023, Datenblatt Bagger 1 m3 Erdaushub	0,028	-
ÖKOBAUDAT 2023, Datenblatt LKW	-	0,14
Kuhn 2023	0,008	0,114
Fuchs 2023	0,012	0,135
Piatek 2021	0,04	0,202
von der Tann 2022	-	0,021 (Länge der Transportwege nicht eindeutig angegeben)

Bodenplatte (KG320)

Die Bodenplatte entspricht im Q-LCA Modell der gemessenen Grundfläche der statistisch ermittelten Gebäude. Sie besteht hauptsächlich aus (armiertem) Beton und Dämmstoff. Der Dämmstoff wird hier der Bodenplatte zugerechnet, obwohl er auch der Decke des unbeheizten Kellers zugerechnet werden könnte.

Bodenbelag (KG320)

Für die Ermittlung der Bodenbelagsflächen wurde die Fläche der Bodenplatte, sowie die Treppenausschnitte (2,00 m² pro Treppe) von der NRF der Gebäude abgezogen. Die Bodenbelagsdeckschicht ist anteilig aufgeteilt in 80 % Parkett und 20 % Fliesen, um die unterschiedlichen Bodenbeläge einer Standardwohnung mit gefliester Küche und Badezimmer sowie die übrigen Wohnbereiche mit Parkett darzustellen.

Für Balkone wurde im Q-LCA Modell von 2,50 m² Balkon pro Wohneinheit ausgegangen. Die Balkone zählen zur NRF und werden entsprechend in den Boden- und Deckenflächen berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurden sonstige Balkonbauteile wie Geländer, Brüstungen oder Abdichtungen.

Außenwände (KG 330)

Die Außenwandfläche entspricht im Modell der gemessenen Fassadenflächen der statistisch generierten Gebäude abzüglich der Fenster- und Türflächen. Die Fassadenflächen unterscheiden sich wiederum bei verschiedenen Gebäudetypen und unterschiedlichen Dichten. Außenwände unterscheiden sich im Modell in ihrer Bauweise nach Holz oder mineralisch sowie in ihren Energiekennwerten durch unterschiedliche Dämmstärken (vgl. Tabelle 7). Holzaußenwände sind in Rahmenbauweise gefertigt. Für den Massivbau wurde eine Kalksandstein-Mauerwerkswand angenommen. Außenwände in mehrgeschossigen Gebäuden (über 2,5 Geschosse) wurden aufgrund ihrer aussteifenden Funktion mit einer stärkeren Konstruktionsdicke angenommen als solche in niedrig geschossigen Gebäuden.

Tabelle 7:
Definition der Wandkonstruktionen für Bilanzierung

E-Standard	Konstruktion Außenwand		U-Wert	GWP (kg CO ₂ eq/m ² *a)
70 kWh ENEV 2014	Massivbauweise	gering	0,293	1,71
		hoch	0,288	2,13
	Holzbauweise		0,248	0,79
30 kWh	Massivbauweise	gering	0,185	1,94
		hoch	0,183	2,36
	Holzbauweise		0,108	0,88
15 kWh	Massivbauweise	gering	0,156	2,05
		hoch	0,125	2,64
	Holzbauweise	gering	0,180	0,97
		hoch	0,146	1,09

Fenster (KG 330)

Zur Ermittlung der Fensterflächen wurde ein prozentualer Fensterflächenanteil herangezogen. Vorangegangene Studien berechneten Fensterflächenanteile entweder in Bezug auf die Hüllfläche oder die Wohnfläche (Ebert et al. 2020; Loga et al. 2005). In einer Studie von Loga et. al (2005) wurde der Fensterflächenanteil pro m² Wohnfläche berechnet. Er ergab für kleine Gebäudetypen einen Anteil von etwa 20 % und für große Gebäudetypen einen Anteil von 17-19 % Fensterflächenanteil pro m² Wohnfläche. Im Q-LCA Modell wurden dementsprechend für kleine Gebäudetypen 20 % und für große 18 % Fensterflächenanteil pro m² Wohnfläche angesetzt. Es wurden dreifachverglaste Holzfenster angenommen.

Außentüren (KG 330)

Bei Außentüren wird von einer Fläche von 2 m²/Tür ausgegangen. Zur Bestimmung der Anzahl der Außentüren wurde davon ausgegangen, dass bei kleinen Gebäudetypen jedes Gebäude über eine Haustür und je eine weitere Außentür pro Wohneinheit verfügt. Bei großen Gebäudetypen wurden zwei Haustüren angenommen. Zusätzlich wurde auch bei den großen Gebäudetypen mit einer weiteren Außentür pro Wohnung gerechnet. Für die Außentür wurde eine standardmäßige Holzhaustür aus der ÖKOBAUDAT verwendet.

Keller (KG 330)

Bei großen Gebäudetypen werden 12 m² Kellerfläche pro Wohneinheit angenommen. Bei kleinen Gebäudetypen verfügt jedes zweite Gebäude über einen Keller bzw. wird im Modell mit 50 % Unterkellerung eines jeden Gebäudes gerechnet. Kellerwände entsprechen daher den Außenwandflächen eines halben Geschosses für kleine und eines ganzen Geschosses für große Gebäudetypen. Keller werden im Modell grundsätzlich als unbeheizt betrachtet (zu den Flächenannahmen siehe Kapitel 6.2.2).

Innenausbau (KG 340)

Beim Innenausbau wurde zwischen tragenden und nichttragenden Innenwänden differenziert. Die Mengenermittlung erfolgte über das Ausmaß verschiedener repräsentativer Gebäudegrundrisse aus der Passivhaus-Datenbank. Der Innenausbau der Wohnungen wurde dann mit der Anzahl Wohneinheiten des jeweiligen Gebäude- und Dichtetyps multipliziert. Wohnungstrennwände wurden je hälftig zu den angrenzenden Wohnungen zugeordnet. Grundsätzlich wurde von einer lichten Raumhöhe von 2,50 Metern ausgegangen.

Für Kellerinnenwände werden dieselben Konstruktionen angenommen, allerdings umfasst der Keller in kleinen Gebäudetypen nur die Hälfte der Grundfläche, weshalb auch die Mengen der Innenwände halbiert wurden. Bei großen bzw. hochgeschossigen Gebäuden wurden 100 % der Grundfläche angerechnet. Tragende Innenwänden in Massivbauweise in hochgeschossigen Gebäuden (über 2,5 Geschosse) wurden aufgrund ihrer aussteifenden Funktion stärker angenommen als solche in niedriggeschossigen Gebäuden.

Innentüren (KG 340)

Zur Ermittlung der Anzahl von Innentüren wurden abermals die repräsentativen Gebäudetypen aus der Passivhaus-Datenbank herangezogen. Die Türen wurden pro Wohneinheit gezählt und auf Gebäude-, Segment- und Siedlungsebene hochskaliert.

Decken (KG 350)

Die Deckenfläche entspricht grundsätzlich der Bodenfläche abzüglich der Treppenausschnitte. Allerdings wurden kleine Gebäudetypen, also Gebäude mit 2,5 Geschossen oder weniger, nur halb unterkellert. Daher wird im Fall der kleinen Gebäudetypen auch nur eine halbe Decke zwischen Keller und EG berechnet.

Treppen (KG 350)

Beim Aufbau der Treppen wird davon ausgegangen, dass Gebäude mit über 2,5 Geschossen über eine Massivtreppe verfügen, während kleinere Gebäude wie EFH, DH und RH über eine Holztreppe verfügen, ungeachtet der Tatsache, ob sie insgesamt ein Holz- oder Massivbau sind. Bei den Gebäudetypen EFH, DH und PH wurde ein zentrales Treppenhaus zur Erreichung aller Wohneinheiten angenommen. Bei den Typen RH, ZH und MGH wurden mehrere dezentrale Treppenhäuser zur Erreichung aller Wohneinheiten angenommen. Die Treppenzahl wurde in Abhängigkeit von der Anzahl an Wohneinheiten und Geschossigkeit skaliert.

Dach (KG 360)

Bei Häusern mit geringer Geschossigkeit in Massiv- und Holzbauweise wird immer ein Satteldach in Holzbauweise angenommen. Bei Häusern mit hoher Geschossigkeit wird immer ein Flachdach angenommen, wobei hier in Holz-Flachdach und Massiv-Flachdach unterschieden wird.

6.3.2 Gebäudetechnik (KG 400)

Die Kostengruppe 400 umfasst alle jene Bauteile, welche die Haustechnik ausmachen. Das umfasst die Lüftungsanlagen, Stromkabel, Förderanlagen und Anlagentechnik für die Wärmeversorgung, die gesondert im Kapitel 6.4 beschrieben ist.

Abwasser-, Wasser- und Gasanlagen (KG 410)

Die im Modell berücksichtigte Anlagentechnik ist in Kapitel 6.4 Wärmeversorgungsanlagen (KG 420) und Energiebedarf im Betrieb sowie im Anhang in dem Abschnitt Wärmeversorgung beschrieben.

Wärmeversorgung (KG 420)

Die Annahmen zur Wärmeversorgung sind separat in Kapitel 6.4 *Wärmeversorgungsanlagen (KG 420) und Energiebedarf im Betrieb* sowie im Anhang im Abschnitt Wärmeversorgung dargestellt.

Lüftungsanlagen (KG 430)

Für die Ermittlung der Längen von Lüftungskanälen wurden exemplarisch reale Projekte verschiedener Gebäudetypen aus der Passivhaus-Datenbank ausgewertet (z.B. Behrens 2011). Aus den jeweiligen Lüftungsplänen wurden die Längen der Zu- und Abluftleitungen ausgemessen und pro Gebäudetyp eine durchschnittliche Kanallänge pro m² Wohneinheit ermittelt. Für alle Gebäude wurde eine zentrale Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung angenommen, da die im Forschungsprojekt getroffenen Annahmen zum Energiebedarf ziemlich hoch sind, sowie im Hinblick auf innenliegende Bäder in den großen Gebäudetypen Lüftungsanlagen ebenfalls eine plausible Annahme darstellen.

Stromversorgung (KG 440)

Die Stromversorgung innerhalb der Wohneinheiten wurde aus der durchschnittlichen Elektrik-Ausstattung von Wohnräumen entnommen (Unterfrauner 2023) und mit einem Elektrik-Plan für eine 4-Zimmer-Wohnung aus dem Handbuch zum Technischen Ausbau von Gebäuden (Wellpott/Bohne 2006: 462) geprüft. Als durchschnittliche Leitungslänge pro Steckdose, Schalter bzw. Leuchtenanschluss wurden 10 Meter angenommen. Alle Werte in der hausinternen Stromversorgung hängen signifikant von der tatsächlichen Ausstattung und der Wohnungsgröße ab und können deshalb in der Praxis von den hier ermittelten Werten abweichen.

Kommunikations-, sicherheits- und informationstechnische Anlagen (KG 450)

Die Bauteile dieser Kostengruppe wurden ermittelt, jedoch aufgrund ihres sehr geringfügigen Anteils am GWP nicht im Modell einbezogen.

Förderanlagen (KG 460)

Es wurde davon ausgegangen, dass die Geschosse von großen Gebäudetypen neben den Treppen auch durch zusätzliche Aufzüge verbunden werden. Das bedeutet, dass alle Gebäude mit mehr als 2,5 Geschossen über Aufzüge verfügen. Dabei deckt ein Aufzug jeweils dieselbe Anzahl Geschosse ab, wie ein gesamtes Treppenhaus desselben Gebäudes.

6.3.3 Außenanlagen und Freiflächen (KG 500)

Die Kostengruppe 500 umfasst Elemente außerhalb der Gebäude, die im Rahmen der Außenflächen eines Bauprojekts anfallen. Das beinhaltet alle unter- und oberirdischen Infrastruktureinrichtungen sowie Maßnahmen für den Erdbau. Als Vorannahme für die Außenanlagen wurde im Modell davon ausgegangen, dass die Siedlungen auf einem ebenen Gelände neu erstellt werden. Es fallen daher keine besonderen Bauwerke zur Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit von Abwasser in der Kanalisation an und es müssen keine besonderen Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel ein hoher Grundwasserspiegel, berücksichtigt werden. Besondere arbeitsbegleitende Entwässerungs- und Sicherungsmaßnahmen der Baugruben sind nach dieser Annahme ebenfalls nicht erforderlich.

Erdaushub (KG 510)

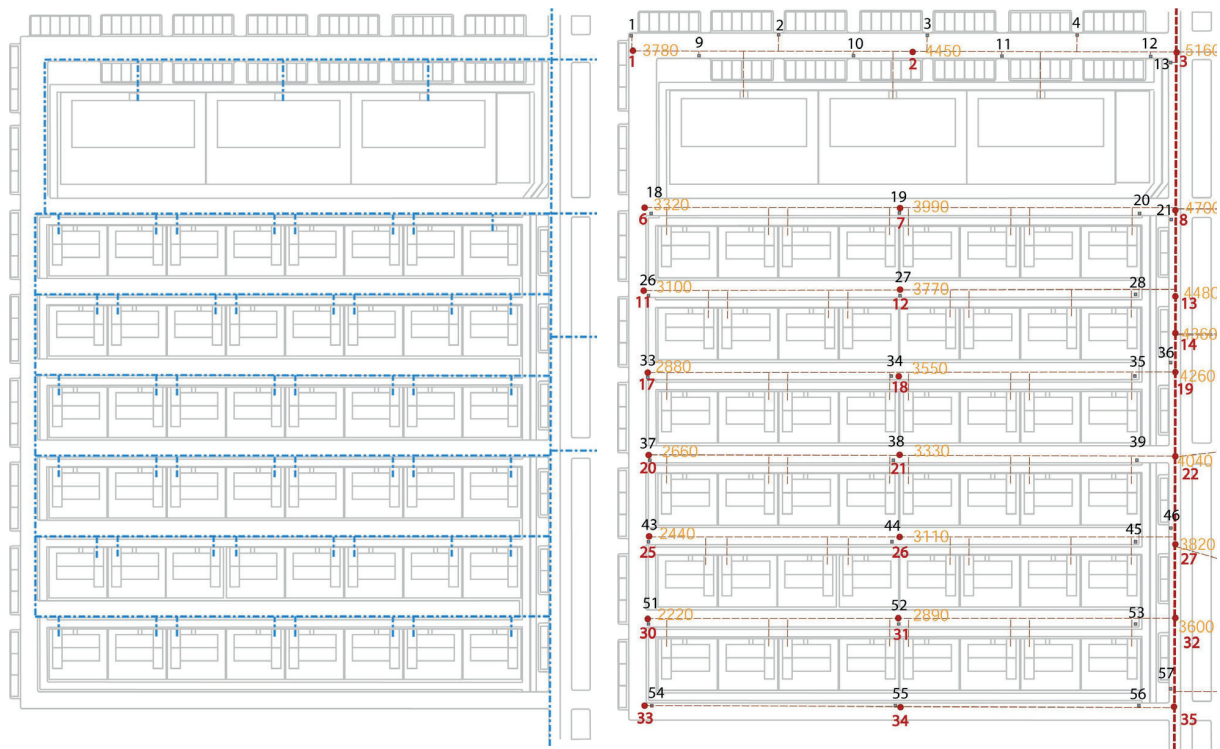
Die Vorannahmen für den Erdaushub der Siedlungsinfrastruktur sind im Kapitel 6.3.1 Erdaushub (KG 310 und KG 510) beschrieben.

Wasserver- und Abwasserentsorgung (KG 540)

Entsprechend der Studie von Schuchardt (2006) wurde für das Modell die Annahme getroffen, dass Trink- und Abwasserkanäle entlang der Straßen verlaufen. Das Abwassersystem verläuft mittig in den Straßen und liegt am tiefsten Punkt, während die Trinkwasserleitungen meist an einer Straßenseite verlaufen (Abbildung 42). In beiden Systemen versorgen Sammelleitungen mehrere Gebäude gemeinsam, während Hausanschlüsse zu einzelnen Gebäuden führen (Schuchardt 2006). Sammelleitungen und Hausanschlüsse wurden im Modell aufgrund der unterschiedlichen Rohrdicke separat bilanziert.

Abbildung 42:

Schematische Darstellung des Verlauf eines Trinkwassernetzes (links in blau) und Abwassernetzes (rechts in rot) entlang der Straßen innerhalb einer Siedlung (Schuchardt, 2006, Seite 52 und 56).



Stromleitungen (KG 550)

Auf der Quartiersebene wird zwischen allgemeiner Stromversorgung, Straßenlicht-, Telefon- und Breitbandkabelversorgung unterschieden. Alle Werte beziehen sich auf die Verlegung des jeweiligen Systems, während der Aushub separat im Modell addiert wird.

6.4 Wärmeversorgungsanlagen (KG 420) und Energiebedarf im Betrieb

6.4.1 Methodik zur Bilanzierung der Wärmeversorgungsanlagen

Die Auswahlkriterien für die Varianten zur Wärmeerzeugung ergeben sich aus den im Projekt definierten Parametern, der Gesetzgebung in Deutschland und Europa sowie realistischer Annahmen aus Praxisbeispielen und „best practice“-Siedlungen (Rid/Wolpensinger 2025). Das Bilanzierungsmodell sieht eine standortunabhängige Betrachtung der Siedlungssegmente und Siedlungstypen vor. Dies bedeutet für die Wärmeversorgung, dass auch die Wärmeerzeuger und zugehörige Infrastruktur im besten Fall losgelöst von jeglichen Standortparametern sind.

Da dies die Auswahl an geeigneten Wärmeerzeugern erheblich einschränkt, können standortbezogene Kriterien wie Bodentemperaturen, Außentemperaturen oder Energieträger zur Bereitstellung von Fernwärme über statistisch gemittelte Werte für den Standort Deutschland aus Daten des Bundesamtes für Statistik und des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) ersetzt werden.

Ausgehend von einer Literaturrecherche wurde zunächst eine Vorauswahl unterschiedlicher nach heutigem Stand in Neubau und Bestand eingesetzter Heizungssysteme recherchiert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile nach folgenden Kriterien bewertet:

1. Die zu untersuchenden Wärmeversorgungssysteme sollen unabhängig von standortspezifischen Parametern in ganz Deutschland umsetzbar sein. Sie sollten möglichst ressourcenunabhängig sein, um einen Siedlungsneubau in Deutschland möglichst realistisch abbilden zu können.
2. Politik und Gesetzgebung: In Deutschland und Europa gibt es durch die Gesetzgebung mehrere Vorgaben zur Verringerung des CO₂-Ausstoßes im Gebäudesektor, zum Beispiel das Bundes-Klimaschutzgesetz (Bundesregierung 2019) und das Gebäudeenergiegesetz (Bundesregierung 2020). Hierbei werden Vorgaben zur Erreichung der Klimaziele und Steigerung des Klimaschutzes gemacht, wie z.B. das Ziel der Klimaneutralität in 2045 nach dem Pariser Klimaabkommen von 2015. Damit verbunden sollten für den Neubau von Siedlungen und Quartieren in Deutschland möglichst regenerative und klimaneutrale Wärmeversorgungstechniken bevorzugt werden.

Die recherchierten Wärmeversorgungssysteme wurden gemäß der genannten Kriterien und aktuellen Gesetzeslage im Kontext der Siedlungsvarianten auf Relevanz in der Planungs- und Baupraxis geprüft. Während andere Studien (u. a. Hegger et al. 2015; König 2017; Mahler et al. 2019, siehe Kapitel 2) in ihren Analysen eine sehr viel größere Anzahl an Wärmeversorgungssystemen berücksichtigt haben, konnten im Rahmen des Projektumfangs hier nur eine exemplarische Auswahl bilanziert werden. Hierin begründet sich die Auswahl der drei gewählten Wärmeversorgungssystemen, für die Ökobilanzen erstellt wurden. Das Modell lässt sich aber um weitere Varianten erweitern. Im Folgenden sind das Verfahren zur Variantenauswahl sowie die für die nachfolgende Bilanzierung getroffenen Annahmen und eventuellen Unsicherheiten beschrieben.

6.4.2 Recherche und Auswahl der Versorgungsvarianten

Um eine grobe Vorauswahl zu treffen, wurden „best practice“-Beispiele (Schrade et al. 2022; Rid/Wolpensinger 2025) für klimaneutrale Quartiere betrachtet und die genutzten Technologien in einer Übersicht zusammengetragen. Zur Vorauswahl der Wärmeerzeuger wurden folgende technische Systeme betrachtet:

Dezentrale (gebäudeweise) Versorgungskonzepte:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden/ Erdkollektoren
- Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe
- Gas-Brennwertkessel mit solarer Trinkwarmwasserbereitung
- Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizungsunterstützung
- Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe
- Biomassekessel
- Biomassekessel mit solarer Trinkwarmwasserbereitung
- Biomassekessel mit solarer Heizungsunterstützung
- Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel für Spitzenlast
- Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel für Spitzenlast

Zentrale (quartiersbezogene) Versorgungskonzepte (Nahwärme):

- Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdsondenfeld
- Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Agrothermie/ Erdkollektoren
- Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Abwasserwärmerückgewinnung
- Solarthermie mit saisonaler Speicherung und Gas-BHKW
- Hackschnitzel BHKW und Hackschnitzelkessel
- Solarthermie mit saisonaler Speicherung und Holzhackschnitzelkessel
- Kalte Nahwärme gespeist aus Erdsonden
- Kalte Nahwärme gespeist aus Agrothermiekollektoren
- Kalte Nahwärme aus Abwasserwärme
- Fernwärme

Nach einer detaillierten Diskussion und Abwägung dieser Auswahl wurden aufgrund der oben genannten Kriterien einige Wärmeerzeuger nicht weiter berücksichtigt:

Gaskessel/ Gas-BHKW

Ein Gaskessel ist ein konventionelles Heizsystem, das durch die Verbrennung von Erdgas Wärme für Heizung und Warmwasser erzeugt. Dabei wird das Gas in einer Brennkammer verbrannt, die entstehende Wärme über einen Wärmetauscher an das Heizwasser abgegeben. Moderne Brennwertkessel nutzen zusätzlich die Kondensationswärme des Abgases, was die Effizienz erhöht (s. u.). Ein Gas-BHKW (Blockheizkraftwerk) erzeugt gleichzeitig Strom und Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung). Es besteht aus einem gasbetriebenen Motor oder einer Turbine, die einen Generator antreibt und die dabei entstehende Abwärme aus Motor und Abgas für Heiz- oder Warmwasserzwecke nutzt. BHKW's erreichen damit einen Gesamtnutzungsgrad von bis zu 90 % und sind besonders effizient bei konstantem Wärmebedarf, z. B. in Mehrfamilienhäusern oder Quartieren. Beide Systeme basieren auf fossiler Energie, können aber auch mit Biogas oder Wasserstoff klimafreundlicher betrieben werden. Im Hinblick auf die Klimaschutzziele sind diese Wärmeversorgungssysteme nur bedingt geeignet, um Klimaneutralität im Gebäudesektor zu erreichen (Sterchele et al. 2020).

Abwärme-Wärmepumpe/ Abwasser-Wärmepumpe

Diese Art der Wärmeversorgung nutzt die im Abwasser oder in Prozesswärme enthaltene Wärmeenergie, um Gebäude zu beheizen oder Warmwasser bereitzustellen. Die Wärmepumpe entzieht dem Abwasser (z. B. aus Duschen, Waschmaschinen oder der Kanalisation) oder industrieller Abwärme thermische Energie – selbst bei niedrigen Temperaturen um 10–20 °C. Über einen Wärmetauscher wird diese Energie auf ein Kältemittel übertragen, das verdampft. Ein Kompressor erhöht die Temperatur des verdampften Kältemittels, bevor die Wärme an das Heizsystem abgegeben wird. Anschließend kühlt das Kältemittel wieder ab, und der Kreislauf beginnt von vorn. Dank der ganzjährig relativ konstanten Temperatur von Abwasser ist diese Technik besonders energieeffizient und kann zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung beitragen – vor allem in Städten oder in Kombination mit Nahwärmenetzen (BWP 2009). Allerdings ist die Nutzung von Abwärme stark von den Prozessen und Branchen ihrer Quellen abhängig. Sie birgt eine großflächige Varianz in Temperaturniveaus, Saisonalität und Verfügbarkeit (Koch et al. 2023), welche sie für eine mittlere Betrachtung schwer berechenbar macht. Abwasser-Wärmepumpen stehen ähnlichen Herausforderungen und zusätzlichen Kriterien gegenüber in Form der Vermeidung von Biofilmbildung und des Platzbedarfs für Erholungsstrecken der Kanalisation um die Beeinflussung der Wärmeübertrager untereinander zu vermeiden (Koch et al. 2023).

Grundwasser-Wärmepumpe

Die Grundwasser-/ Wasser-Wasser-Wärmepumpe ist durch ihr gleichbleibendes Temperaturniveau die leistungsfähigste Form der Wärmepumpe. Aber sie ist durch ihre geologischen Bedingungen in der Region und

der örtlichen Grundwasserbeschaffenheit in ihrer Leistung durch ihren Standort definiert und wurde daher im Weiteren nicht berücksichtigt. Eine großflächige Nutzung des Grundwassers zur Wärmeengewinnung und Kühlung stößt aufgrund von Flächenkonkurrenzen in urbanen Siedlungsdichten auch an Grenzen, da sich die einzelnen Grundwasserbrunnen gegenseitig beeinflussen und die Wärmeentzugsleistung merklich mindern (Koch et al. 2023).

Warmes Nahwärmenetz über Solarthermie und Biomassekessel (Spitzenlastkessel)

Hier erfolgt eine saisonale Wärmebereitstellung über eine Übergabestation mit Solarthermie (im Sommerfall) und Biomasse (im Winterfall). Durch Wärmespeicher wird eine Verminderung des Biomasseverbrauchs angestrebt. Ein Nachteil dieser leitungsgebundenen Wärmeversorgung ist der relativ hohe Platzbedarf (Rid/Wolpensinger 2025.; Koch et al. 2023).

Fernwärme

Fernwärme ist ein zentrales, leitungsgebundenes Wärmeversorgungssystem, das für eine hohe Besiedlungsdichte geeignet ist und lokal kaum Platzbedarf für die Anlagentechnik benötigt. Die Wärme wird in einem Heizwerk oder Kraftwerk erzeugt und über ein isoliertes Rohrleitungssystem in Form von heißem Wasser (meist 70–130 °C) zu den angeschlossenen Gebäuden transportiert. Dort gibt es die Energie über einen Wärmetauscher an das Heizsystem des Gebäudes ab, das abgekühlte Wasser fließt über das Rücklaufnetz zurück ins Heizwerk und wird erneut erhitzt. Fernwärme ist besonders effizient und klimafreundlich, wenn Abwärme oder erneuerbare Energiequellen genutzt werden. Informationen für die Vorauswahl wurden aus den statistischen Grunddaten für Deutschland zusammengesetzt (BDEW 2024).

Versorgungssysteme mit großen Wärmespeichern

Aufgrund fehlender Daten wurde auf die Betrachtung von Versorgungssystemen mit größeren bis sehr großen Wärmespeichern (Saisonalspeicher) verzichtet, da sich diese auf Basis der aktuellen Daten der ÖKOBAUDAT nicht realitätsnah abbilden lassen. Unter Berücksichtigung der genannten Kriterien fiel die Entscheidung auf Wärmeerzeuger, welche einen Großteil der Anforderungen erfüllen und die aufgrund verfügbarer EPD's und Daten in der ÖKOBAUDAT-Datenbank im gesteckten Projektrahmen auch bilanzierbar sind. Zur weiteren Bilanzierung für das Projekt wurden folgende Wärmeerzeuger ausgewählt, die im Folgenden näher beschrieben werden:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe dezentral
- Kaltes Nahwärmenetz über Erdsondenfeld und Sole-Wasser-Wärmepumpe
- Erdgas-Brennwertkessel (Status Quo)

Luft-Wasser-Wärmepumpe dezentral

Eine dezentrale Luft-Wasser-Wärmepumpe ist ein Heizsystem, das in einzelnen Gebäuden installiert wird. Dabei wird die Umgebungswärme aus der Außenluft genutzt, um Energie effizient in nutzbare Wärme umzuwandeln. Das System besteht aus einem Außengerät, das der Luft auch bei niedrigen Temperaturen Wärme entzieht, und einem Innengerät, das die gewonnene Wärme an das Heiz- und Warmwassersystem des Hauses abgibt. Der technische Prozess basiert auf einem Kältekreis, indem ein Ventilator zunächst die Außenluft ansaugt. Ein Verdampfer überträgt die Luftwärme auf ein Kältemittel, das bereits bei niedriger Temperatur verdampft. Daraufhin verdichtet ein Kompressor das Kältemittel, wodurch seine Temperatur stark ansteigt. In einem Verflüssiger gibt das heiße Kältemittel die Wärme an das Wasser im Heizkreislauf ab und ein Expansionsventil senkt den Druck des Kältemittels wieder, so dass der Kreislauf von vorne beginnt.

Die erzeugte Wärme kann für Fußbodenheizungen, Heizkörper oder Warmwasserbereitung genutzt werden. Da der Stromverbrauch nur einen Teil der erzeugten Wärmeenergie ausmacht, arbeiten Luft-Wasser-Wärmepumpen sehr effizient – besonders bei gut gedämmten Gebäuden. Da jedes Gebäude seine eigene Wärmepumpe besitzt, sind Luft-Wasser-Wärmepumpen besonders für Ein- und Zweifamilienhäuser geeignet, einfach zu installieren und benötigen keine aufwändige Infrastruktur wie Bohrungen oder Nahwärmenetze. In Kombination mit Photovoltaik kann die Wärmepumpe besonders klimafreundlich betrieben werden.

Nach aktuellem Stand ist die Luft-Wasser-Wärmepumpe die meist eingebaute Wärmeversorgungstechnik für Einfamilienhäuser im Neubau (BDEW 2023), welche mit den Vorgaben des GEG vereinbar ist. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe ist relativ Standort unabhängig einsetzbar. Ihr COP ist nicht so hoch, wie der einer Erd- oder Grundwasser-Wärmepumpe, dies ist im Einsatz in kleineren und gut gedämmten Gebäuden jedoch vernachlässigbar. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe wird im Projekt dezentral, also nicht an die Leitung eines angrenzenden Netzes gebunden, geplant.

Kaltes Nahwärmenetz über Erdsondenfeld und Sole-Wasser-Wärmepumpe

Dieses leitungsgebundene Wärmeversorgungssystem kombiniert geothermische Energie und Wärmepumpentechnologie in einem dezentralen Netz. Im Zentrum steht das Erdsondenfeld, ein Verbund mehrerer vertikaler Bohrungen in den Untergrund, über die Erdwärme in Form von niedrigen Temperaturen (ca. 8–12 °C) entnommen wird. In den Sonden zirkuliert eine frostsichere Flüssigkeit (Sole), die die Erdwärme aufnimmt und über ein kaltes Nahwärmenetz zu den angeschlossenen Gebäuden transportiert. „Kalt“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Wärmenetz selbst keine hohen Temperaturen führt – anders als bei der klassischen Fernwärme. Stattdessen bleibt die Temperatur niedrig und energieeffizient, was Verluste minimiert. In jedem angeschlossenen Gebäude ist eine Sole-Wasser-Wärmepumpe installiert, die der ankommenden Sole die gespeicherte Umweltwärme entzieht und deren Temperatur mit Hilfe elektrischer Energie auf ein nutzbares Niveau für Heizung und Warmwasser anhebt. Vorteile dieses Systems sind:

- Hohe Energieeffizienz und geringe Verluste durch niedrige Netztemperaturen,
- Nutzung erneuerbarer Erdwärme ohne Verbrennung,
- modularer Aufbau: neue Gebäude können nachträglich angeschlossen werden,
- geringer Platzbedarf, da keine eigene Tiefenbohrung pro Haus erforderlich ist.

Solche Systeme eignen sich besonders für Neubaugebiete oder Quartierslösungen und leisten einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung.

Erdgas-Brennwertkessel (Status Quo)

Aufgrund der hohen aktuellen Einsatzzahlen von Gas-Brennwertkesseln im Bestand wird diese Variante als Status Quo erstellt, um als Basis für mögliche Vergleiche zu dienen (BDEW 2023; Nagler et al. 2019). Ein Erdgas-Brennwertkessel ist ein modernes Heizsystem, das Erdgas besonders effizient in Wärme umwandelt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Heizkesseln nutzt er nicht nur die Wärme aus der Verbrennung des Gases, sondern zusätzlich auch die in den Abgasen enthaltene Kondensationswärme, indem der bei der Verbrennung entstehende heiße Wasserdampf aus den Abgasen in einem Brennwertwärmetauscher gezielt abgekühlt wird, sodass er kondensiert. Hierdurch wird zusätzliche Wärme freigesetzt, die ebenfalls zum Heizen genutzt wird und die Energieverluste minimiert. Durch die Rückgewinnung der Kondensationswärme erreicht der Brennwertkessel einen Wirkungsgrad von bis zu 98 %, bezogen auf den Heizwert des Gases. Das macht ihn effizienter als ältere Heizkessel, die diese Wärme ungenutzt über den Schornstein abgeben.

Um CO₂-Emissionen zu vermeiden, kann der Kessel mit Bioerdgas oder synthetischem Methan betrieben werden, das aus organischen Abfällen oder Power-to-Gas-Verfahren stammt. Dadurch wird die CO₂-Bilanz deutlich verbessert. Eine weitere Möglichkeit zu Hybridlösungen mit einer Solarthermieanlage oder einer Wärmepumpe, die besonders im Sommer oder in Übergangszeiten den fossilen Energiebedarf senken.

6.4.3 Prozessmodellierung mit nPRO, Excel und eLCA

Zur Erstausslegung und Dimensionierung der thermischen Leistung in Siedlungsgröße wurden zunächst einige Wärmeerzeuger und Siedlungssegmente mit der Energiesimulations-Software nPro betrachtet. Die Anlagendimensionierung für die idealtypischen Siedlungen (sechs Hektar) wurde nach den drei Dichte-Parameter (gering, mittel, hoch) und den Energiebedarfsstandards von 15, 30 und 70 kWh/m² mit verschiedenen Wärmeerzeugern und Wärmespeichern vorgenommen. Die Ergebnisse wurden tabellarisch in einer Excel-Matrix aufbereitet und zur Entscheidungsfindung für die Wärmeerzeuger-Auswahl hinzugezogen.

Die Modellierung in nPro wurde genutzt, um einen beispielhaften Überblick über die möglichen Massen pro NRF und die verbundene thermische Leistung zu erhalten. Genaue Werte und Daten für die weitere Bearbeitung in Excel wurden aus nPro nicht übernommen, sondern durch Werte aus Literatur und Forschung ersetzt und in Formeln zur dynamischen Abbildung in Excel umgewandelt. Zur Dimensionierung und Auslegung der unterschiedlichen Wärmeerzeugungssysteme wurden alle Daten und Verbräuche über Abhängigkeiten in einer Excel-Tabelle unter Nutzung von Literaturwerten berechnet. Für jedes Wärmeversorgungssystem wurde eine Excel-Mappe erstellt und alle Verbräuche und Bedarfe für alle Gebäudetypen und Dichtevarianten berechnet. Zusätzlich wurden anhand von Werten des Umweltbundesamtes und des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle die CO₂-Erträge, welche durch den Betrieb der einzelnen Wärmeerzeuger entstehen, berechnet. Damit keine Doppelungen entstehen, wurde die Betriebsphase in eLCA nicht modelliert.

Zur Simulation und Berechnung der Ökobilanz der Wärmeerzeugung wurde in eLCA für alle Gebäudetypen (Einfamilien-, Doppel-, Reihen-, Zeilen-, Punkt- und Block/Winkel) jeweils ein Projekt mit Modellgebäuden erstellt. Innerhalb der einzelnen Projekte wurden Varianten für die einzelnen Siedlungsdichten (gering, mittel und hoch) und Erschließungstypen (Gitter-, Schlaufen- und Sackgassenerschließung) angelegt. Die unterschiedlichen Wärmeerzeuger wurden für alle Projekte und Varianten angelegt und je nach bilanziertem Wärmeerzeuger durch ein- oder ausschalten des jeweiligen Bauteils für die Berechnung herangezogen.

Im nächsten Schritt wurden für alle Gebäudetypen die beheizten Nutzflächen sowie die Anzahl der Bewohner herangezogen, um die damit verbundenen Heiz- und Warmwasserbedarfe für ein einzelnes Gebäude auszulegen. In der Excel-Datei wurden zusätzlich die jeweiligen Leitungslängen für Warm-, Kalt- und Heizungswasser, sowie Heizflächen, Infrastruktur und Technikflächen für Solarthermie und Photovoltaik ermittelt. In eLCA wurden dann die Wärmeversorgungsanlagen mit dem jeweiligen Wärmeerzeuger, den erforderlichen Heizflächen und Verteilungsleitungen pro Gebäude und Siedlungsdichte modelliert und die Ergebnisse auf den Flächenkennwert skaliert. Analog wurde die Trinkwarmwasserversorgung mit Strangleitungen, Hausanschluss und Zweigleitungen modelliert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in die Gesamtbilanzierung eingeflossen.

6.4.4 Datenkritik

Die Bilanzierung der technischen Gebäudeausrüstung gestaltete sich aufgrund einer stark eingeschränkten Verfügbarkeit von LCA-Daten zur Energieinfrastruktur schwierig. Da in der verwendeten Datenbank für einige Baustoffe keine Datensätze vorhanden waren, konnten einige Bauteile nicht mit den gewünschten Materialien oder nur durch eigene Annahmen grob als "Ersatzbauteil" modelliert werden. Da in eLCA das bisherige Augenmerk größtenteils auf der Bilanzierung der Gebäudehülle lag, werden beispielsweise für Lebenszyklusanalysen auf Basis der QNG-Vorgaben für die Bilanzierung der technischen Gebäudeausrüstung anstelle einer detaillierten Modellierung TGA-Sockelbeiträge angegeben. Es fehlen noch Datensätze für Bauteile zur Beschreibung der Infrastruktur, wie Leitungen und Verbindungen für Heizungs- und Sanitärsysteme. Für den Großteil der im Projekt modellierten Rohrsysteme des Heizungssystems wurden daher beispielsweise Edelstahlrohre anstelle von Kupfer- oder Verbundrohren gewählt, da keine passenden Werte oder Daten im genutzten Datensatz vorhanden waren. Ebenfalls stark lückenhaft sind Kalt- und Warmwasserleitungen - sowohl hinsichtlich der Leitungs- als auch der Leitungsisolationsmaterialien -, sowie Zuleitungen der Gas-Infrastruktur und Leitungen mit großen Durchmessern für das Nahwärme- und Fernwärmenetz.

Die Auswahl an nutzbaren dezentralen Wärmeerzeugern hingegen ist durchaus zahlreich, jedoch sind Wärmeerzeugungssysteme für zentrale Wärmeversorger zur Versorgung von Nahwärme- und Fernwärmenetze nicht vorhanden. Durch ihre Darstellung durchschnittlicher und herstellerunabhängiger Wärmeerzeuger erscheinen die Daten der ÖKOBAUDAT zu dezentralen Wärmeerzeugern ungenau. So können einige Wärmeerzeuger nur oberflächlich betrachtet werden. Beispielsweise gibt es in eLCA (ÖKOBAUDAT) keine Massen-technische Unterscheidung zwischen einem 20 kW Biomassekessel oder einem 120 kW Biomassekessel und die nächst größere Unterscheidung erfolgt von einem 120 kW Kessel zu einem 400 kW Kessel.

Ebenso kritisch muss die Modellierung von Photovoltaik und anderen regenerativen Technologien betrachtet werden. Aufgrund ihrer energie- und ressourcenintensiven Herstellungsweise fallen Photovoltaik- und Solarthermiemodule bei der Betrachtung der grauen Energie sehr stark ins Gewicht. Aufgrund ihrer durchschnittlichen Betrachtung der Herstellungsweise der PV-/Solarmodule werden dynamische Ressourcen- und Herstellungsanpassungen aufgrund von Innovation und Druck durch Gesetzgebung und Politik nicht abgebildet. Die hohen Werte in Modul A1-3 (Herstellung der Module mit Vorketten) können jedoch durch die Solarstromerträge in Modul B6 ausgeglichen werden. So können je nach Gütesiegel unterschiedlicher Anbieter (DGNB, QNG, BNB, etc.) Endenergie der durch die Photovoltaik erzeugten Stromerträge mit den Endenergien der allgemeinen Stromverbräuche verrechnet werden. Dieses wird am Ende der Bilanzierung vom GWP-Wert abgezogen und bildet im Endergebnis den ökologischen Mehrwert der Photovoltaik- und Solarthermiemodule für den Lebenszyklus der betrachteten Gebäude ab.

Das Modul B6 konnte in unserer Berechnung nicht mit einbezogen werden, weil hierfür die benötigte Endenergieberechnung und eine genaue Auslegung und Berechnung des Strom- und Wärmeertrags der Photovoltaik- und Solarthermieranlage hätte erfolgen müssen, was aber für die vielen Varianten innerhalb des Projektzeitraums nicht umsetzbar war. Die Module B1-B5 sowie B7 werden standardmäßig in eLCA nicht berechnet und konnten entsprechend nicht berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der überschaubaren Datenlage muss die Variante Fernwärme kritisch betrachtet werden. Die ÖKOBAUDAT verfügt über keine auf NRF übertragbaren Daten oder Baustoffe zur Beschreibung von wärmeerzeugenden Versorgern wie z.B. Müllverbrennungsanlagen, Industrieabwärme oder regenerativen Wärmeversorgern. Die Vorketten der Wärmeerzeugung der Module A1-3 können so nicht in die Bilanzierung mit einbezogen werden. Somit kann nur die Herstellung der verwendeten Infrastruktur und Anschlüsse an das Gebäude betrachtet werden, welches das Ergebnis der grauen Energie für die Variante „Fernwärme“ nicht einheitlich abbildet und den Gesamt-GWP-Wert für die Module A1-A3 verbessert.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei den mit eLCA durchgeführten Modellierungen teilweise vermutlich größere Datenlücken bei relevanten Gebäude- und energietechnischen Anlagen bestehen, was bei der Analyse und Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

6.5 Haushaltsstrom

Bei der Energie- und Ökobilanzierung von Wohngebäuden wird der Verbrauch an Haushaltsstrom üblicherweise nicht berücksichtigt, da er nicht ursächlich dem Betrieb eines Gebäudes zuzuschreiben, nicht unmittelbar durch städtebauliche Faktoren beeinflusst und stark vom Nutzungsverhalten der Bewohnerinnen und Bewohner abhängig ist. Da der Haushaltsstrom aber eine relevante Größenordnung im Energieverbrauch einer Siedlung aufweist, wurde der anteilige Verbrauch in dieser Studie dennoch bilanziert und separat ausgewiesen, um eine möglichst vollständige Siedlungsökobilanz zu ermitteln. Die Bereitstellung erfolgt zumeist vom übergeordneten Energieversorgungssystem, das neben der eigentlichen Nutzung von Primärenergien wie der Verbrennung von Kohle, Erdgas oder der Energiewandlung aus erneuerbaren Energiequellen auch die graue Energie für die Anlagentechnik und Verteilungsinfrastruktur umfasst. Diese Energieaufwendungen und das damit verbundene GWP wurden hier aber nicht in der Bilanz berücksichtigt.

Für die Ermittlung des GWP für den Haushaltsstrom wurde zunächst der jährliche Strombedarf pro Kopf für verschiedene Haushaltsgrößen ermittelt. Mit zunehmender Haushaltsgröße sinkt der durchschnittliche Jahresstromverbrauch, da sich insbesondere die Grundlast einiger Geräte (z.B. Kühlschrank) auf eine größere Personenzahl verteilt (Abbildung 43, Tabelle 8).

Abbildung 43:

Strombedarf der Haushalte. Durchschnittlicher Jahresstromverbrauch (ohne Heizstrom) je Haushalt nach Haushaltsgrößen (BDEW 2021).

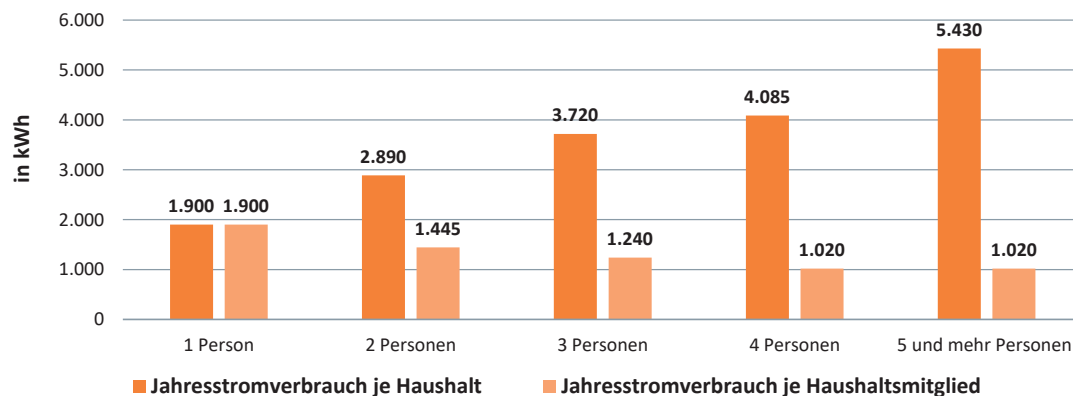
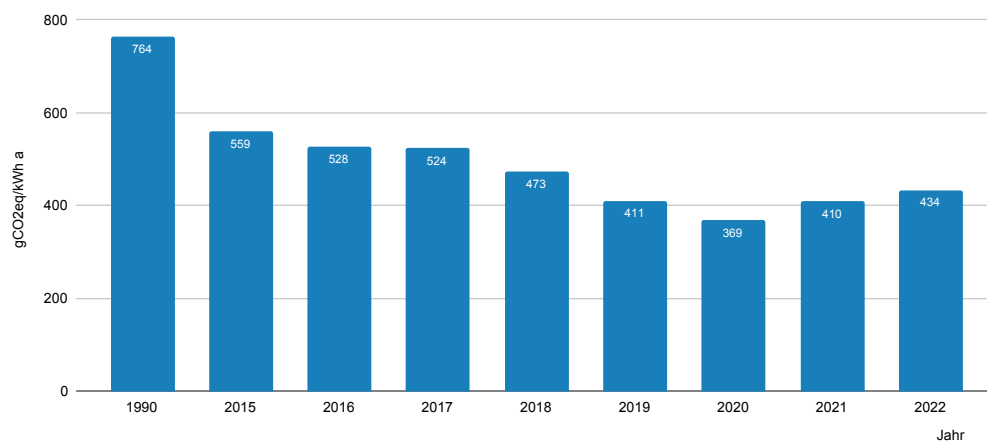


Tabelle 8:

Haushaltsgrößen und Strombedarf pro Haushalt und Jahr (Referenzjahr 2022). Datenquellen: (1) Umweltbundesamt 2024 a, b ; (2) BDEW 2021

Größe	Haushalte (1) Anzahl in tsd	Anteil %	Jahresstrom- verbrauch je Haushalt (2) kWh/a	Jahresstromver- brauch je Haus- haltsmitglied (2) kWh/a	Summe / Haushalt kWh/a
1-Person	17.007	41,15	1.900	1.900	78.183,6
2-Personen	13.845	33,50	2.890	1.445	48.405,6
3-Personen	4.937	11,95	3.720	1.240	14.812,2
4-Personen	3.943	9,54	4.085	1.021	9.743,0
5-Personen +	1.598	3,87	5.430	1.020	3.943,8
Summe	41.330	100			155.088,2
Durchschnitt					1.550

Anhand der statistischen Daten zu Anzahl und Verteilung der Haushaltsgrößen in Deutschland (Statistisches Bundesamt 2024) lässt sich ein statistischer Mittelwert für den jährlichen Pro-Kopf-Stromverbrauch einer Person ermitteln. Dieser Wert liegt etwa bei 1.550 kWh. In Verbindung mit dem durchschnittlichen GWP für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom, lässt sich das GWP für den jährlichen Stromverbrauch berechnen. Die Daten für den deutschen Strommix werden u.a. vom Umweltbundesamt bereitgestellt (Umweltbundesamt 2024). Aus verschiedenen Studien geht hervor, dass bei der Erzeugung des in Deutschland verbrauchten Stroms pro Kilowattstunde in etwa 300-400g CO₂eq ausgestoßen werden. Anhand dieser Daten wurde das GWP des pro-Kopf-Haushaltsstroms definiert (Abbildung 4, Tabelle 9).

Abbildung 44:Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den deutschen Strommix. Datenquelle: Umweltbundesamt 2024 a, b).**Tabelle 9 :**Entwicklung des durchschnittlichen GWP/ kWh * Jahr * Person sowie des GWP/ kWh * Jahr * m² Nutzfläche (bei einer Bezugsfläche von 47,4 m² Nutzfläche/Person) seit 1990. Datenquelle: Umweltbundesamt 2024 a, b

Jahr	GWP g CO ₂ eq/kWh*a	Strombedarf kWh/Person*a	GWP / Person kg CO ₂ eq/Person*a	GWP/ Nutzfläche kg CO ₂ eq/m ² *a
1990	764	1.551	1.185	25,00
2015	559	1.551	867	18,29
2016	528	1.551	819	17,28
2017	524	1.551	813	17,14
2018	473	1.551	834	15,48
2019	411	1.551	637	13,45
2020	369	1.551	572	12,07
2021	410	1.551	636	13,41
2022	434	1.551	673	14,20

7. Ergebnisse der Quartiersökobilanz

Im Folgenden ist eine Auswahl der Ergebnisse dargestellt, die aus den mit Hilfe des Rechenmodells erhobenen Daten erstellt wurden und als Grundlage für die Interpretation der Wirkungsbeziehungen dienen. Zum besseren Verständnis, wie diese Auswahl zustande gekommen ist, sind hier einige Informationen über die verwendeten Indikatoren, Auswertungskategorien und Darstellungsweisen vorangestellt.

Indikatoren als Flächen- und Personkennwerte

Im Rechenmodell wurde für jede der 972 Siedlungsvarianten das Gesamt-GWP erhoben. Davon abgeleitet sind im Weiteren die Auswertungsergebnisse entweder in GWP pro Netto-Raumfläche ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$) oder in GWP pro Person ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/Person} \cdot \text{a}$) angegeben, die jeweils anteilig über einen Lebenszyklus von 50 Jahren berechnet wurden. Im Folgenden werden beide Indikatoren zur Auswertung herangezogen, was jeweils in den Bezeichnungen der Grafiken ausgewiesen ist, zumeist erfolgt die Darstellung aber nur für einen Indikator. Zwischen den Ergebnissen der flächen- und personenbezogenen Indikatoren gibt es Differenzen im Ranking der GWP-Werte. Dies ist vor allem auf die im Modell zugewiesenen unterschiedlichen Belegungsdichten der Wohneinheiten und der baulichen Dichte zurückzuführen (vergl. Kapitel 7.2.2). Da Gebäudetypen typischerweise unterschiedliche Wohnungsgrößen aufweisen - in Einfamilien- oder Zweifamilienhäusern gibt es in der Regel keine kleinen Wohnungen (Varianten mit Einliegerwohnungen wurden im Modell nicht berücksichtigt) -, wurden den kleineren Gebäudetypen eine höhere Pro-Kopf-Wohnfläche zugewiesen, was zu einem unterschiedlichen Ranking bei den flächen- und personenbezogenen Indikatoren führt.

Auswertungskategorien und deren Varianten

Die Auswertung erfolgt nach den zentralen Parametern oder Kostengruppen 300 bis 500 sowie für die Lebenszyklusphase B6 (Betriebsenergie) mit dem Ziel, die Wirkmächtigkeit der einzelnen Parameter zu identifizieren. Diese Auswertungen beruhen entweder auf Mittelwerterhebungen oder auf einer differenzierten Darstellung, meist durch eine Eingrenzung der Varianten mit Parametervariationen bei ansonsten jeweils vergleichbaren konstruktiven oder technischen Ausführungen. Letzteres ermöglicht eine bessere Analyse des Einflusses der untersuchten Parameter. Hierfür wurden die Siedlungsvarianten auf drei Ebenen mit jeweils verschiedenen Samples an Varianten gebildet:

1. Auswertung von 972 Siedlungsvarianten. Dies umfasst die Gesamtmenge aller Varianten und ermöglicht einen vollständigen Überblick zu den Ausprägungen der untersuchten Merkmale.
2. Auswertung von 162 Siedlungsvarianten. Da sich bei der Auswertung gezeigt hat, dass die unterschiedlichen Merkmalsausprägungen einiger Parameter keine, nur geringfügige oder relativ konstante Unterschiede im GWP bewirken - wie z.B. der Haushaltsstrom, die Varianten zur Siedlungerschließung oder die Unterscheidung nach Holz- und mineralischer Bauweise -, wurden diese in diesem Auswertungsschritt ausgesondert. Durch eine Reduktion der Redundanz in der Variantenvielfalt wird die Wirkmächtigkeit einzelner Parameter sichtbarer, ohne dass sich hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse signifikante Verzerrungen ergeben.
3. Auswertung von 54 Siedlungsvarianten oder weniger. Auf dieser Auswertungsebene wurden weitere, weniger wirkmächtige Parameter aussortiert, um die Wirkungen anderer im Detail besser zu erkennen und zu analysieren. Das betrifft beispielsweise die Abhängigkeiten zwischen dem Energiekennwert und dem GWP der wärmetechnischen Anlagen.
4. Auswertung des Anteils einzelner Faktoren der jeweiligen Parameter am Siedlungs-GWP auf einer detaillierten Ebene, beispielsweise einzelne Bauteilgruppen der Kostengruppe 300 wie Fassade oder Geschosdecken.

Darstellungsweisen und Skalierung der Grafiken

Um die mit dem Bilanzierungsmodell erzeugten Ergebnisse zu verstehen, ist ein *prozesshaftes Schauen* erforderlich. Es ist zweckmäßig, sich verschiedene Parameterwerte gleichzeitig zu vergegenwärtigen, um die aus den gegenseitigen Abhängigkeiten entstehenden Beziehungsmuster zu erkennen. Hierfür wurden sogenannte Daten-Dashboards als Überblicksdarstellungen entwickelt, um die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern sichtbar zu machen. Ein Daten-Dashboard ist eine visuelle Schnittstelle, mit der verschiedene, miteinander zusammenhängende Daten und Kennzahlen übersichtlich dargestellt werden. Diese Form der Datenvisualisierung ermöglicht eine Filterung nach verschiedenen Kategorien, um komplexe Informationen auf einen Blick verständlich darzustellen. Mit Hilfe dieser Diagramme können Korrelationen zwischen den Parametern identifiziert werden, die auf einen Wirkmechanismus und nicht nur auf ein zufälliges Zusammentreffen, also eine Koinzidenz, hinweisen. Hierdurch lassen sich Muster erkennen, die eine wichtige Grundlage für die weiteren Interpretationen bilden. Die Daten-Dashboards sind im Tool interaktiv angelegt, sodass Nutzer durch Filter eigene Konfigurationen anlegen können, um eigene Datenbeziehungen untersuchen zu können.

Bei den Darstellungen der Grafiken ist weiterhin zu beachten, dass die angegebenen Skalen für das GWP auf der Y-Achse stark variieren können, da die verschiedenen Parameter unterschiedliche Auswirkungen auf das Gesamt-GWP haben. Das kann auf den ersten Blick zu einer Verzerrung der wahrgenommenen Ergebnisse führen. Bei einer einheitlichen Skalierung der Y-Achse hingegen, könnten die Differenzen innerhalb der jeweiligen Parameter aber nicht genügend unterschieden werden.

Weitere Randbedingungen

Die Bilanzierung der Baukonstruktion (KG 300) erfolgte jeweils inklusive des Aushubs, da dieser ebenfalls bei der Siedlungsinfrastruktur (KG 500) berücksichtigt worden ist und so eine bessere Vergleichbarkeit zwischen KG 300 und KG 500 ermöglicht. Die dazu getroffenen Annahmen sind in Kapitel 6.3.1 dargestellt.

7.1 Auswertungen des GWP auf Siedlungsebene nach Parameter und Kostengruppen

7.1.1 Gesamtauswertung von 972 und 162 Siedlungsvarianten

Einen ersten Ergebnisüberblick ermöglichen Darstellungen mit einem hoch aggregierten GWP-Kennwert, der sich aus der Summe aller bilanzierten Teilsysteme ergibt. Die Darstellung erfolgt in zwei Varianten:

(1) in tabellarischer Form als "Heat-Maps", und (2) in Daten-Dashboards mit Balkendiagrammen.

(1) In Tabelle 10 (Seite 94) und Tabelle 11 (Seite 95) ist jeweils das Gesamt-GWP für alle **972 Siedlungsvarianten** dargestellt, in Tabelle 10 für das flächenbezogene GWP [in kg CO₂ eq/m² NRF * a], in Tabelle 11 für das personenbezogene GWP [in kg CO₂ eq/ Person * a]. Für eine bessere Lesbarkeit wurde den ermittelten Kennwerten Farbfelder zugeordnet, wobei die Farbintensität mit zunehmendem Siedlungs-GWP zunimmt. So entstand eine "Heat-Map", die zunächst einen allgemeinen Überblick zum Gesamtergebnis des Siedlungs-GWP für die jeweils modellierten Gebäude- und Siedlungstypen ermöglicht. Die Maximalwerte sind jeweils rot, die Minimalwerte grün umrandet. Vertikal sind die Gebäudetypen aufsteigend von kleinen zu großen Gebäudeformen dargestellt, abwechselnd in Holz- und Massivbauweise mit steigendem Energiekennwert und nach den drei untersuchten Wärmeversorgungsvarianten differenziert. Horizontal sind die städtebaulichen Parameter variiert, jeweils von geringer zu hoher städtebaulicher Dichte, jeweils unterschieden nach Gitter-, Schlaufen- und Sackgassenerschließung.

Als erstes Ergebnis zeigt sich, dass die städtebauliche Erschließungsform (Gitter-, Schlaufen- und Sackgassenerschließung) bei sonst gleichbleibenden Parametern keinen und nur einen sehr geringen Einfluss auf das

Siedlungs-GWP hat. Einen größeren Einfluss hat die städtebauliche Dichte, die vor allem bei den kleinen Gebäudetypen Einfamilien- und Doppelhaus mit zunehmender Dichte zu einer signifikanten Verringerung des Siedlungs-GWP beiträgt. Im Durchschnitt kann eine höhere städtebauliche Dichte bei Einfamilienhaussiedlungen etwa 15 % am Siedlungs-GWP einsparen (personenbezogener Indikator, vergl. Abbildung 106), was u.a. durch einen höheren Anteil an städtebaulicher Infrastruktur pro Nutzfläche begründet ist. Besonders ineffizient ist die Wärmeversorgung einer EFH-Bebauung durch ein kaltes Nahwärmenetz, wo sich bei einem EFH in Holzbauweise mit niedrigem Heizwärmebedarf (15 kWh) zwischen niedriger und hoher städtebaulicher Dichte eine maximale Differenz von $4,9 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$ ergibt - ein Anteil von mehr als einem Drittel am Siedlungs-GWP. In der Baupraxis ist das allerdings ein unübliches Szenario.

Die "Heat-Map" zeigt weiterhin deutlich, in welchem Maß ein höherer Heizwärmebedarf jeweils zum Siedlungs-GWP beiträgt und ein Vergleich der "Heat-Maps" für das flächen- und personenbezogene GWP zeigt den Einfluss der Belegungsdichte auf das Siedlungs-GWP. Während beim flächenbezogenen GWP das Optimum bei Reihenhaussiedlungen hoher Dichte liegt (auch bei einem höheren Heizwärmebedarf), zeigt die Auswertung des personenbezogenen GWP eine eindeutige Effizienzsteigerung bei Siedlungen mit großen Gebäudetypen und eine stark abnehmende Effizienz bei Einfamilienhaussiedlungen geringer Dichte. Die Belegungsdichte ist somit ein Einflussfaktor mit einer großen Hebelwirkung für die Planung ressourceneffizienter Siedlungen.

(2) Die Auswertung mit den Daten-Dashboards erfolgte ebenfalls jeweils für den Flächenindikator (Abbildung 45, Seite 96) und den Personenindikator (Abbildung 46, Seite 97) ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms. Die Darstellung zeigt jeweils von der linken zur rechten Seite aufsteigend das $\text{GWP}_{\min}$ zu $\text{GWP}_{\max}$. Es zeigt sich einerseits eine starke Streuung der GWP-Werte im Bereich der Parameter Gebäudetyp, Baukonstruktion (KG 300) und städtebauliche Erschließung (KG 500), andererseits aber auch klare Tendenzen hinsichtlich der Parameter Energiekennwerte und Wärmeversorgung. Die Höhe des Siedlungs-GWP wird in einer Bandbreite von ca. 2 bis ca. $16 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$ maßgeblich durch das GWP für Betriebsenergie (B6) bestimmt, das durch den Energiebedarf (Energiekennwert) und den wärmetechnischen Versorgungsanlagen (KG 420) determiniert wird. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe-Varianten (LW- Wärmepumpe) weisen hierbei durchweg das geringste GWP auf, während für die Anlagentechnik der kalten Fernwärme deutlich höhere GWP-Werte zu verbuchen sind, denen aber geringe Betriebsemissionen in der Nutzungsphase gegenüberstehen (vergl. Kapitel 7.1.5).

Bei gleichen Gebäudetypen und Energiekennwerten zeigt sich ebenfalls deutlich, dass mit ansteigender Dichte das GWP geringer wird. Besonders ausgeprägt ist das bei dem Personen-Kennwert zu erkennen, sowohl bei Dichtezunahme innerhalb der gleichen Gebäudetypologie, als auch zwischen den Gebäudetypen (Abbildung 48). Kleine Gebäudetypen, insbesondere Einfamilienhäuser, haben im Allgemeinen ein höheres GWP, wobei dieses vor allem auch stark vom Energiekennwert und der Wahl der Versorgungstechnik beeinflusst wird.

Für KG 300 ist deutlich zu erkennen, dass über alle Gebäudetypen hinweg - bei ansonsten vergleichbaren Randbedingungen (E-Kennwert, Dichte usw.) - das GWP für die Holzbauweise gegenüber der mineralischen Bauweise um etwa $1,4$ bis $2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$ geringer ist (siehe detaillierte Betrachtung in Kapitel 7.1.4). Auch in KG 500 (infrastrukturelle Erschließung und Aushub) sinkt das GWP mit steigender Siedlungsdichte zwischen 1 und $1,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$, was besonders bei den kleinen Gebäudetypen einen signifikanten Unterschied macht. Hier sind aber auch die Auswirkungen des Baus von Tiefgaragen deutlich zu erkennen, die das GWP bei den größeren Gebäudetypen um jeweils ca. $2 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$ erhöhen. Die absoluten Auswirkungen sind aber mit einem Anteil von etwa 1 bis $3 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$ am Siedlungs-GWP relativ gering und haben nur bei den Siedlungsvarianten mit kleinen Gebäuden eine Relevanz (siehe detaillierte Betrachtung in Kapitel 7.2.2).

Durch die Reduktion der Auswertung auf **162 Siedlungsvarianten** (Abbildungen 49 und 50) zeigen sich diese beobachteten Zusammenhänge noch deutlicher. Weitere Erkenntnisse lassen sich bei der Verwendung des Rechentools gewinnen, indem durch verschiedene Sortierlogslogiken der Einfluss einzelne Parameter auf das Siedlungs-GWP genauer untersucht werden kann.

Tabelle 10:
NRF-flächenbezogener GWP aller 972 Varianten [kg CO₂ eq/ m² NRF * a] (Maximalwert in rot, Minimalwert in grün)

Gebäude			Infrastruktur	Dichte	Geringe Dichte			Mittlere Dichte			Hohe Dichte		
Typ	Bauart	Energiebedarf	Erschließung	Versorgungsart	Gitter	Schlaufe	Sackgasse	Gitter	Schlaufe	Sackgasse	Gitter	Schlaufe	Sackgasse
Einfamilienhaus	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe	12,5	12,0	12,0	11,4	11,1	11,2	10,3	10,3	10,3	
			Nahwärme kalt	18,0	17,5	17,5	14,8	14,5	14,6	13,1	13,5	13,5	
			Erdgas	14,9	14,4	14,4	13,8	13,6	13,7	12,7	12,8	12,8	
		30 kWh	LW Wärmepumpe	13,7	13,2	13,2	12,7	12,5	12,6	11,7	11,8	11,8	
			Nahwärme kalt	19,0	18,4	18,4	15,9	15,6	15,7	14,3	14,6	14,6	
			Erdgas	17,2	16,7	16,7	16,3	16,1	16,2	15,4	15,5	15,5	
	Massiv	70 kWh	LW Wärmepumpe	17,3	16,8	16,8	16,6	16,4	16,5	15,8	15,8	15,9	
			Nahwärme kalt	21,8	21,3	21,3	19,0	18,7	18,8	17,5	17,9	17,9	
			Erdgas	23,6	23,2	23,2	23,3	23,1	23,2	22,8	22,8	22,8	
		15 kWh	LW Wärmepumpe	13,6	13,2	13,2	12,8	12,6	12,7	11,4	11,5	11,5	
			Nahwärme kalt	19,2	18,6	18,6	16,3	16,0	16,1	14,2	14,7	14,7	
			Erdgas	16,0	15,5	15,5	15,3	15,0	15,1	13,8	14,0	14,0	
Doppelhaus	Holz	30 kWh	LW Wärmepumpe	14,8	14,4	14,4	14,2	13,9	14,0	12,8	12,9	13,0	
			Nahwärme kalt	20,1	19,5	19,5	17,3	17,0	17,1	15,3	15,8	15,8	
			Erdgas	18,3	17,8	17,8	17,8	17,5	17,6	16,5	16,6	16,7	
		70 kWh	LW Wärmepumpe	18,3	17,9	17,9	17,9	17,7	17,7	16,8	16,9	16,9	
			Nahwärme kalt	22,9	22,3	22,3	20,2	19,9	20,0	18,5	18,9	18,9	
			Erdgas	24,6	24,2	24,2	24,6	24,4	24,5	23,7	23,8	23,9	
	Massiv	15 kWh	LW Wärmepumpe	11,6	11,0	11,2	10,5	10,2	10,4	9,8	9,6	9,7	
			Nahwärme kalt	16,8	16,0	16,2	13,7	13,4	13,6	12,8	12,6	12,7	
			Erdgas	13,8	13,2	13,4	12,8	12,5	12,7	12,1	12,0	12,1	
		30 kWh	LW Wärmepumpe	12,9	12,3	12,4	11,8	11,6	11,8	11,2	11,1	11,2	
			Nahwärme kalt	17,8	17,0	17,2	14,8	14,4	14,7	13,9	13,7	13,9	
			Erdgas	16,2	15,6	15,7	15,3	15,0	15,2	14,8	14,6	14,8	
Reihenhaus	Holz	70 kWh	LW Wärmepumpe	16,6	15,9	16,1	15,7	15,5	15,7	15,3	15,1	15,2	
			Nahwärme kalt	20,7	20,0	20,1	17,9	17,6	17,8	17,2	17,0	17,1	
			Erdgas	22,8	22,2	22,3	22,3	22,1	22,2	22,1	22,0	22,1	
		15 kWh	LW Wärmepumpe	12,5	11,9	12,1	11,6	11,3	11,5	10,7	10,5	10,7	
			Nahwärme kalt	17,7	16,9	17,1	14,8	14,5	14,7	13,7	13,5	13,7	
			Erdgas	14,7	14,1	14,3	13,9	13,6	13,8	13,1	12,9	13,0	
	Massiv	30 kWh	LW Wärmepumpe	13,8	13,2	13,3	12,9	12,6	12,8	12,1	12,0	12,1	
			Nahwärme kalt	18,6	17,9	18,1	15,8	15,5	15,7	14,9	14,7	14,8	
			Erdgas	17,1	16,5	16,6	16,4	16,1	16,3	15,7	15,6	15,7	
		70 kWh	LW Wärmepumpe	17,4	16,7	16,9	16,7	16,4	16,6	16,1	16,0	16,1	
			Nahwärme kalt	21,5	20,8	20,9	18,9	18,5	18,7	18,0	17,8	17,9	
			Erdgas	23,6	23,0	23,1	23,3	23,0	23,2	23,0	22,8	22,9	
Zeilenhaus	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe	10,1	9,9	9,9	9,7	9,5	9,6	9,4	9,3	9,4	
			Nahwärme kalt	15,1	14,8	14,8	12,8	12,6	12,7	12,5	12,3	12,4	
			Erdgas	12,2	12,1	12,0	11,9	11,7	11,8	11,8	11,6	11,7	
		30 kWh	LW Wärmepumpe	11,4	11,2	11,2	11,1	10,9	11,0	10,9	10,7	10,8	
			Nahwärme kalt	16,1	15,9	15,9	13,9	13,7	13,8	13,6	13,5	13,6	
			Erdgas	14,6	14,4	14,4	14,5	14,3	14,4	14,4	14,3	14,4	
	Massiv	70 kWh	LW Wärmepumpe	15,0	14,8	14,8	15,0	14,8	14,9	15,0	14,9	14,9	
			Nahwärme kalt	19,0	18,7	18,7	17,0	16,8	16,9	16,9	16,8	16,8	
			Erdgas	21,2	21,0	21,0	21,5	21,4	21,4	21,8	21,7	21,8	
		15 kWh	LW Wärmepumpe	10,7	10,5	10,5	10,5	10,3	10,4	10,1	10,0	10,1	
			Nahwärme kalt	15,7	15,5	15,4	13,6	13,4	13,5	13,2	13,0	13,1	
			Erdgas	12,8	12,7	12,6	12,7	12,5	12,6	12,5	12,3	12,4	
Punkthaus	Holz	30 kWh	LW Wärmepumpe	12,0	11,8	11,8	11,8	11,6	11,8	11,6	11,4	11,5	
			Nahwärme kalt	16,7	16,5	16,4	14,7	14,4	14,6	14,3	14,1	14,2	
			Erdgas	15,2	15,0	15,0	15,2	15,0	15,2	15,1	14,9	15,1	
		70 kWh	LW Wärmepumpe	15,6	15,4	15,4	15,7	15,5	15,6	15,6	15,5	15,6	
			Nahwärme kalt	19,5	19,3	19,3	17,7	17,5	17,6	17,5	17,4	17,4	
			Erdgas	21,7	21,5	21,5	22,2	22,1	22,1	22,5	22,3	22,4	
	Massiv	15 kWh	LW Wärmepumpe	11,7	11,6	11,6	11,2	11,1	11,1	10,9	10,9	10,9	
			Nahwärme kalt	15,4	15,3	15,3	13,9	13,9	13,9	13,2	13,1	13,1	
			Erdgas	14,0	13,9	13,9	13,5	13,5	13,4	13,2	13,3	13,2	
		30 kWh	LW Wärmepumpe	13,2	13,1	13,1	12,6	12,6	12,6	12,4	12,4	12,4	
			Nahwärme kalt	16,5	16,4	16,4	15,1	15,0	15,1	14,3	14,3	14,3	
			Erdgas	16,9	16,8	16,7	16,3	16,2	16,3	16,0	16,0	16,0	
Block, Winkel	Holz	70 kWh	LW Wärmepumpe	17,3	17,2	17,2	16,8	16,7	16,8	16,6	16,5	16,5	
			Nahwärme kalt	19,8	19,7	19,7	18,4	18,3	18,4	17,6	17,6	17,6	
			Erdgas	24,3	24,2	24,2	23,7	23,7	23,7	23,5	23,4	23,4	
		15 kWh	LW Wärmepumpe	13,0	12,9	12,9	12,4	12,3	12,4	12,2	12,1	12,2	
			Nahwärme kalt	16,6	16,5	16,5	15,2	15,1	15,2	14,4	14,3	14,4	
			Erdgas	15,3	15,2	15,2	14,7	14,7	14,7	14,5	14,5	14,5	
	Massiv	30 kWh	LW Wärmepumpe	14,5	14,3	14,4	13,9	13,8	13,9	13,6	13,6	13,6	
			Nahwärme kalt	17,8	17,6	17,7	16,3	16,2	16,3	15,5	15,4	15,5	
			Erdgas	18,2	18,1	17,9	17,5	17,5	17,5	17,2	17,2	17,2	
		70 kWh	LW Wärmepumpe	18,5	18,4	18,5	18,0	17,9	18,0	17,7	17,7	17,7	
			Nahwärme kalt	21,0	20,9	20,9	19,6	19,5	19,6	18,8	18,7	18,8	
			Erdgas	25,5	25,4	25,4	24,9	24,8	24,8	24,6	24,6	24,6	
Block, Winkel	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe	12,8	12,5	12,5	11,6	11,5	11,5	11,1	11,1	11,1	
			Nahwärme kalt	15,7	15,4	15,4	13,8	13,7	13,7	12,8	12,8	12,8	
			Erdgas	15,1	14,8	14,8	13,9	13,8	13,8	13,4	13,4	13,4	
		30 kWh	LW Wärmepumpe	14,1	13,8	13,8	13,0	12,9	12,9	12,5	12,5	12,5	
			Nahwärme kalt	16,7	16,4	16,4	14,9	14,8	14,8	13,9	13,9	13,9	
			Erdgas	17,7	17,4	17,4	16,6	16,5	16,5	16,1	16,0	16,1	
	Massiv	70 kWh	LW Wärmepumpe	18,2	17,9	17,9	17,2	17,1	17,1	16,7	16,6	16,7	
			Nahwärme kalt	20,0	19,6	19,6	18,2	18,1	18,1	17,2	17,2	17,2	
			Erdgas	25,2	24,9	24,9	24,1	24,0	24,0	23,6	23,5	23,6	
		15 kWh	LW Wärmepumpe	14,7	14,4	14,4	13,1	13,0	13,0	12,5	12,5	12,5	
			Nahwärme kalt	17,6	17,3	17,3	15,3	15,1	15,1	14,2	14,2	14,2	
			Erdgas	17,0	16,7	16,7	15,4	15,3	15,3	14,8	14,8	14,8	
Massiv	30 kWh	LW Wärmepumpe	16,0	15,7	15,7	14,5	14,3	14,3	13,9	13,9	13,9		
		Nahwärme kalt	18,6	18,2	18,2	16,3	16,2	16,2	15,3	15,3	15,3		
		Erdgas	19,5	19,2	19,2	18,0	17,9	17,9	17,5	17,4	17,5		
	70 kWh	LW Wärmepumpe	20,0	19,7	19,7	18,6	18,5	18,5	18,1	18,0	18,0		
		Nahwärme kalt	21,7	21,4	21,4	19,6	19,4	19,4	18,6	18,5	18,6		
		Erdgas	26,9	26,6	26,6	25,9	25,4	25,4	25,0	24,9	24,9		
Block, Winkel	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe	10,7	10,8	10,8	10,6	10,6	10,6	10,4	10,4	10,4	
			Nahwärme kalt	13,5	13,5	13,5	12,8	12,8	12,8	12,2	12,2	12,2	
			Erdgas	13,2	13,2	13,2	13,0	13,0	13,1	12,8	12,8	12,8	
		30 kWh	LW Wärmepumpe	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,1	11,9	11,9	11,9	
			Nahwärme kalt	14,6	14,6	14,6	13,9	13,9	14,0	13,3	13,4	13,4	
			Erdgas	15,8	15,9	15,9	15,7	15,7	15,7	15,5	15,5	15,5	
	Massiv	70 kWh	LW Wärmepumpe	16,3	16,4	16,4	16,2	16,2	16,2	16,0	16,0	16,0	
			Nahwärme kalt	17,9	18,0	17,9	17,3	17,3	17,3	16,6	16,7	16,7	
			Erdgas	23,3	23,3	23,3	23,1	23,1	23,1	22,9	22,9	22,9	
		15 kWh	LW Wärmepumpe	11,7	11,8	11,8	11,5	11,6	11,7	11,3	11,4	11,4	
			Nahwärme kalt	14,4	14,5	14,5	13,7	13,8	13,8	13,1	13,1	13,2	
			Erdgas	14,1	14,2	14,2	13,9	14,0	14,1	13,7	13,7	13,8	
Massiv	30 kWh	LW Wärmepumpe	13,1	13,2	13,2	13,0	13,0	13,1	12,8	12,8	12,9		
		Nahwärme kalt	15,6	15,6	15,7	14,9	14,9	15,0	14,3	14,3	14,4		
		Erdgas	16,8	16,9	16,9	16,6	16,7	16,7	16,4	16,5	16,5		
	70 kWh	LW Wärmepumpe	17,3	17,4	17,4	17,1	17,2	17,2	16,9	17,0	17,0		
		Nahwärme kalt	18,9	18,9	19,0	18,2	18,3	18,3	17,5	17,6	17,6		
		Erdgas	24,2	24,3	24,3	24,0	24,1	24,1	23,8	23,8	23,9		

Tabelle 11:
 Personenbezogener GWP aller 972 Varianten [kg CO₂-eq/ Person * a] (Maximalwert in rot, Minimalwert in grün)

Gebäude			Dichte			Geringe Dichte			Mittlere Dichte			Hohe Dichte		
Infrastruktur			Erschließung											
Typ	Bauart	Energiebedarf	Versorgungsart			Gitter	Schlaufe	Sackgasse	Gitter	Schlaufe	Sackgasse	Gitter	Schlaufe	Sackgasse
Einfamilienhaus	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe			849	817	816	726	710	715	628	631	633
			Nahwärme kalt			1.226	1.188	1.187	945	925	932	803	826	826
			Erdgas			1.010	978	978	882	865	871	780	784	786
		30 kWh	LW Wärmepumpe			931	899	899	812	796	802	717	719	722
			Nahwärme kalt			1.290	1.252	1.251	1.012	993	999	873	895	895
			Erdgas			1.167	1.135	1.135	1.042	1.026	1.032	943	946	948
		70 kWh	LW Wärmepumpe			1.177	1.145	1.145	1.060	1.044	1.050	967	970	972
			Nahwärme kalt			1.485	1.447	1.446	1.210	1.190	1.196	1.073	1.094	1.094
			Erdgas			1.607	1.577	1.577	1.489	1.472	1.478	1.393	1.395	1.397
	Massiv	15 kWh	LW Wärmepumpe			927	895	895	819	802	808	695	705	707
			Nahwärme kalt			1.305	1.267	1.265	1.038	1.018	1.025	871	900	899
			Erdgas			1.089	1.057	1.056	975	958	964	848	858	859
		30 kWh	LW Wärmepumpe			1.008	977	976	903	887	893	783	792	794
			Nahwärme kalt			1.367	1.329	1.328	1.103	1.084	1.090	939	968	967
			Erdgas			1.244	1.212	1.212	1.133	1.117	1.123	1.010	1.019	1.021
		70 kWh	LW Wärmepumpe			1.246	1.214	1.214	1.142	1.126	1.131	1.027	1.034	1.036
			Nahwärme kalt			1.554	1.516	1.515	1.291	1.271	1.278	1.132	1.159	1.158
			Erdgas			1.676	1.646	1.646	1.570	1.553	1.559	1.452	1.460	1.461
Doppelhaus	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe			729	690	701	616	600	612	550	541	547
			Nahwärme kalt			1.051	1.006	1.017	807	787	801	721	710	717
			Erdgas			867	828	839	752	735	747	684	675	681
		30 kWh	LW Wärmepumpe			808	769	780	695	679	691	633	623	630
			Nahwärme kalt			1.113	1.068	1.079	868	849	862	785	775	782
			Erdgas			1.015	976	987	899	883	895	835	826	832
		70 kWh	LW Wärmepumpe			1.037	999	1.009	925	909	921	862	853	860
			Nahwärme kalt			1.296	1.250	1.262	1.051	1.032	1.045	968	957	964
			Erdgas			1.427	1.388	1.399	1.312	1.296	1.308	1.248	1.238	1.245
	Massiv	15 kWh	LW Wärmepumpe			785	746	757	680	663	675	603	594	601
			Nahwärme kalt			1.107	1.062	1.074	870	851	864	774	763	770
			Erdgas			924	885	895	816	799	811	737	728	735
		30 kWh	LW Wärmepumpe			863	825	835	758	742	753	685	676	683
			Nahwärme kalt			1.169	1.123	1.135	931	912	925	838	827	834
			Erdgas			1.071	1.032	1.042	962	946	958	888	878	885
		70 kWh	LW Wärmepumpe			1.088	1.049	1.060	981	965	977	909	900	907
			Nahwärme kalt			1.346	1.301	1.312	1.108	1.088	1.101	1.015	1.004	1.012
			Erdgas			1.477	1.438	1.449	1.368	1.352	1.364	1.295	1.286	1.292
Reihenhaus	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe			633	622	622	569	557	564	532	524	528
			Nahwärme kalt			944	930	930	754	741	747	705	695	699
			Erdgas			767	756	755	701	688	695	663	654	659
		30 kWh	LW Wärmepumpe			714	703	703	650	638	645	615	606	611
			Nahwärme kalt			1.007	994	994	817	804	811	770	759	764
			Erdgas			915	904	904	850	838	845	814	805	810
		70 kWh	LW Wärmepumpe			942	930	931	880	871	874	846	839	842
			Nahwärme kalt			1.189	1.175	1.175	1.000	989	993	953	945	947
			Erdgas			1.326	1.315	1.314	1.262	1.260	1.258	1.232	1.226	1.228
	Massiv	15 kWh	LW Wärmepumpe			670	660	658	616	602	610	572	562	568
			Nahwärme kalt			981	968	967	809	796	794	765	753	759
			Erdgas			804	794	791	747	733	742	703	692	699
		30 kWh	LW Wärmepumpe			750	740	739	696	683	690	654	644	650
			Nahwärme kalt			1.044	1.031	1.030	863	848	856	809	797	804
			Erdgas			952	942	940	896	882	890	854	843	849
		70 kWh	LW Wärmepumpe			975	964	963	921	911	916	882	874	878
			Nahwärme kalt			1.222	1.209	1.207	1.041	1.030	1.035	988	980	983
			Erdgas			1.360	1.349	1.347	1.304	1.300	1.300	1.268	1.260	1.264
Zeilenhaus	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe			575	569	570	546	544	545	535	535	535
			Nahwärme kalt			753	747	747	681	679	681	643	643	643
			Erdgas			687	682	682	658	660	658	648	650	648
		30 kWh	LW Wärmepumpe			646	641	639	617	615	617	607	605	606
			Nahwärme kalt			808	803	800	737	735	737	699	698	699
			Erdgas			828	822	815	797	794	796	784	783	784
		70 kWh	LW Wärmepumpe			847	842	841	821	818	820	810	809	810
			Nahwärme kalt			969	963	962	900	897	899	861	860	861
			Erdgas			1.188	1.183	1.182	1.160	1.157	1.159	1.146	1.147	1.147
	Massiv	15 kWh	LW Wärmepumpe			635	630	633	606	604	607	595	593	595
			Nahwärme kalt			813	807	810	742	739	742	703	701	703
			Erdgas			747	742	745	719	720	719	707	708	708
		30 kWh	LW Wärmepumpe			707	702	702	678	675	678	666	663	666
			Nahwärme kalt			869	863	864	798	795	798	758	756	758
			Erdgas			889	883	878	858	854	858	843	841	844
		70 kWh	LW Wärmepumpe			907	902	903	880	876	880	867	865	867
			Nahwärme kalt			1.029	1.022	1.024	959	955	959	918	916	918
			Erdgas			1.248	1.243	1.244	1.219	1.215	1.219	1.204	1.203	1.205
Punkthaus	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe			627	612	612	569	564	564	544	542	543
			Nahwärme kalt			770	754	753	675	669	669	627	624	626
			Erdgas			740	725	725	682	676	676	657	654	656
		30 kWh	LW Wärmepumpe			691	676	676	637	631	631	613	611	613
			Nahwärme kalt			818	802	802	728	722	722	681	678	680
			Erdgas			864	849	849	811	805	805	787	784	789
		70 kWh	LW Wärmepumpe			892	877	877	841	835	835	818	814	817
			Nahwärme kalt			978	961	961	890	884	883	844	840	843
			Erdgas			1.232	1.217	1.217	1.180	1.174	1.173	1.155	1.152	1.154
	Massiv	15 kWh	LW Wärmepumpe			718	703	703	640	634	634	614	611	613
			Nahwärme kalt			861	844	844	746	740	740	697	694	695
			Erdgas			831	816	816	753	747	747	726	724	725
		30 kWh	LW Wärmepumpe			781	766	766	708	702	702	682	680	682
			Nahwärme kalt			909	892	892	798	792	792	750	747	749
			Erdgas			954	939	939	882	876	876	856	853	858
		70 kWh	LW Wärmepumpe			978	963	963	909	903	903	884	880	883
			Nahwärme kalt			1.064	1.047	1.047	958	951	951	910	906	909
			Erdgas			1.318	1.303	1.303	1.248	1.241	1.241	1.221	1.218	1.220
Block, Winkel	Holz	15 kWh	LW Wärmepumpe			525	527	527	519	520				
			Nahwärme kalt			659	661	661	626	627	628	595	596	597
			Erdgas			644	646	646	636	637	638	624	626	626
		30 kWh	LW Wärmepumpe			596	598	597	590	590	591	581	582	582
			Nahwärme kalt			715	716	716	681	682	683	653	654	654
			Erdgas			775	777	776	767	768	769	757	758	759
	Massiv	70 kWh	LW Wärmepumpe			799	801	801	794	794	795	784	785	785
			Nahwärme kalt			877	879	878	844	845	845	815	816	816
			Erdgas			1.138	1.140	1.139	1.131	1.132	1.132	1.121	1.122	1.122
		15 kWh	LW Wärmepumpe			572	575	577	564	567	570	552	555	558
			Nahwärme kalt			706	710	711	671	674	677	640	643	645
			Erdgas			691	694	696	682	685	688	669	672	674

Abbildung 45:

Auswertung aller 972 Varianten aufsteigend sortiert nach GWP min - max für Flächen-Indikator (ohne Haushaltsstrom),
GWP in [kg CO₂eq/ m² NRF * a]



Abbildung 46:

Auswertung aller 972 Varianten aufsteigend sortiert von GWP min - max für Personen-Indikator (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO₂eq/ Person * a]

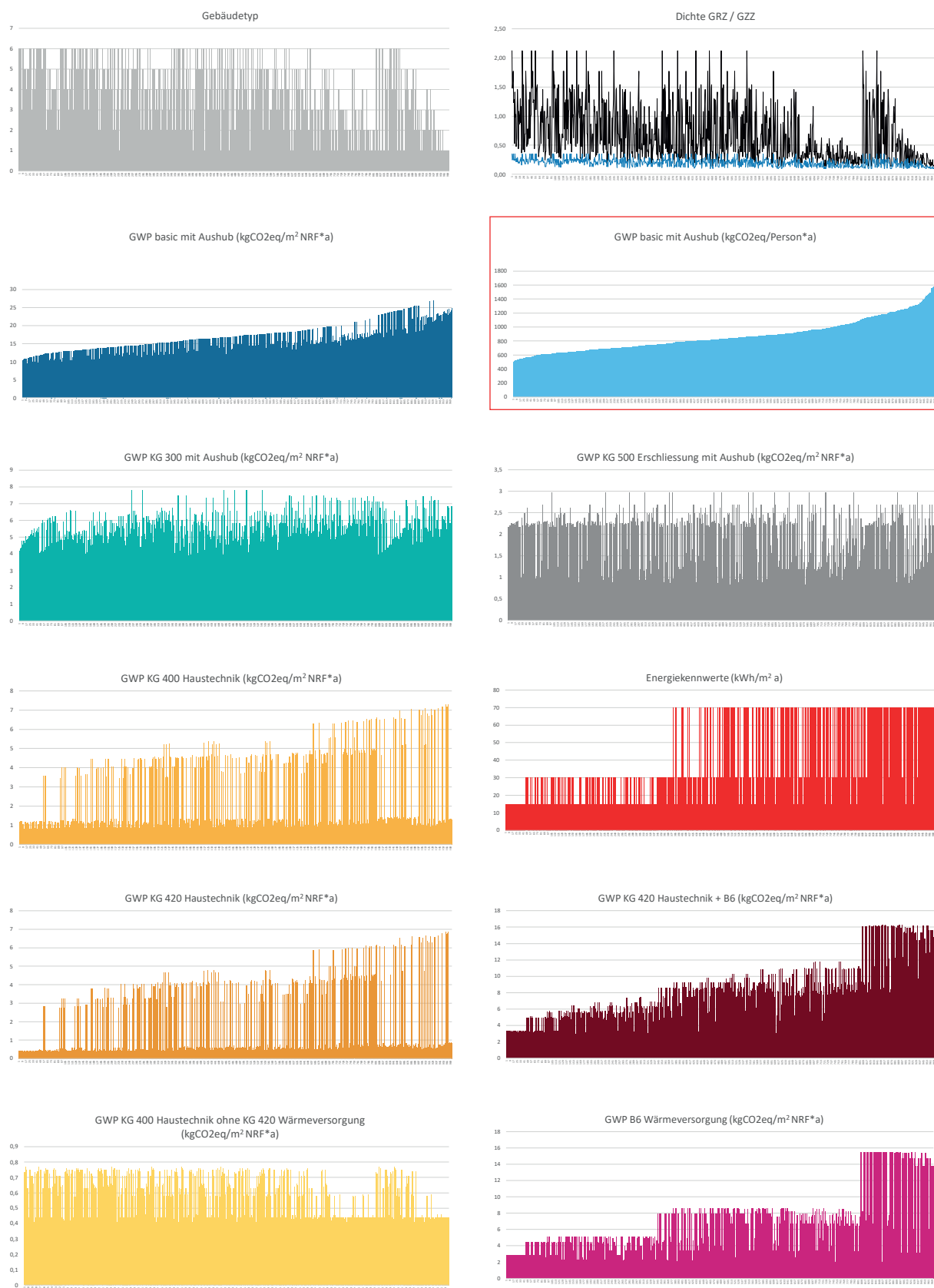


Abbildung 47:

Auswertung aller 972 Varianten sortiert nach Gebäudetypen und aufsteigender Dichtetyp (ohne Haushaltsstrom),
GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

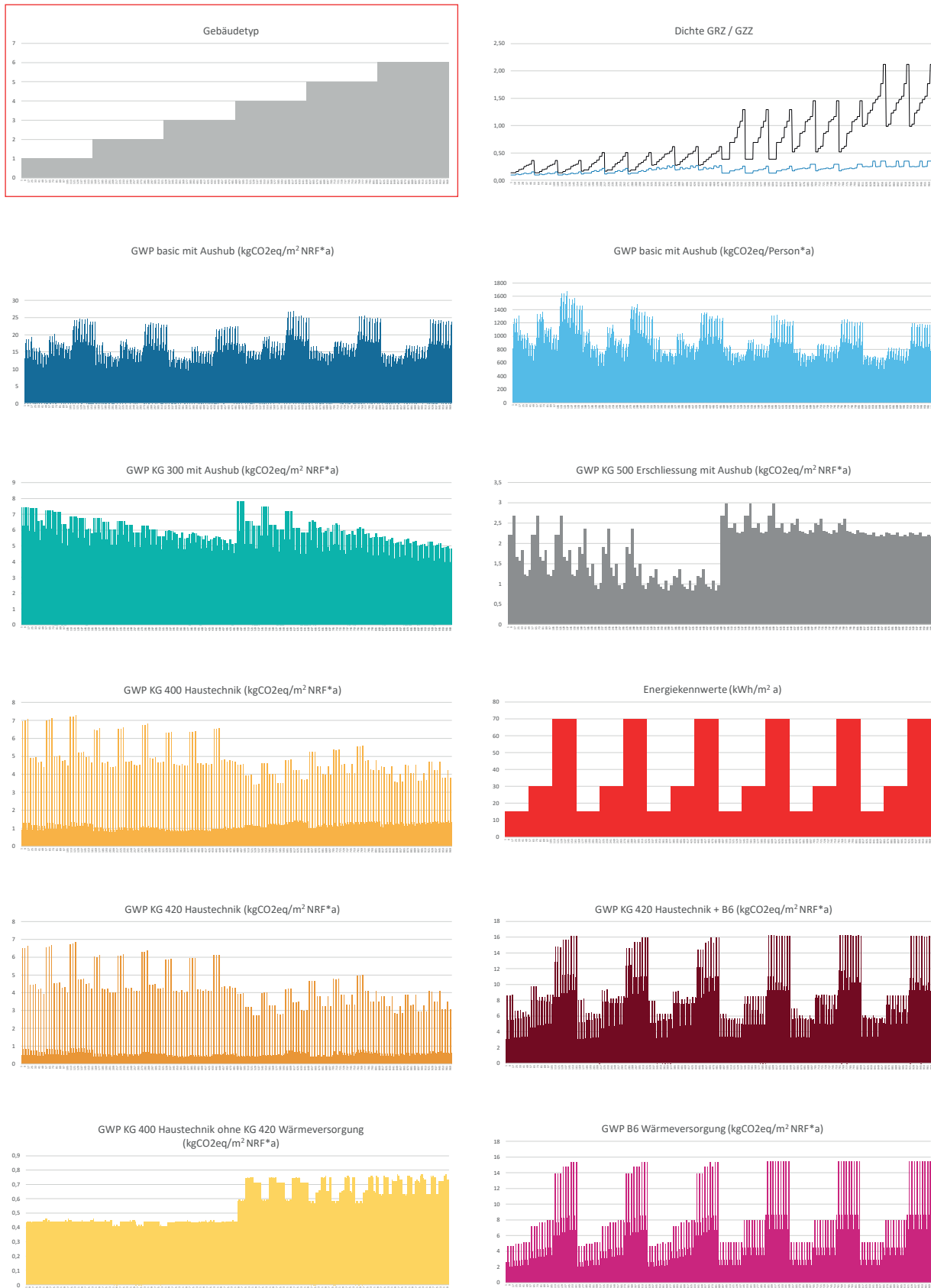


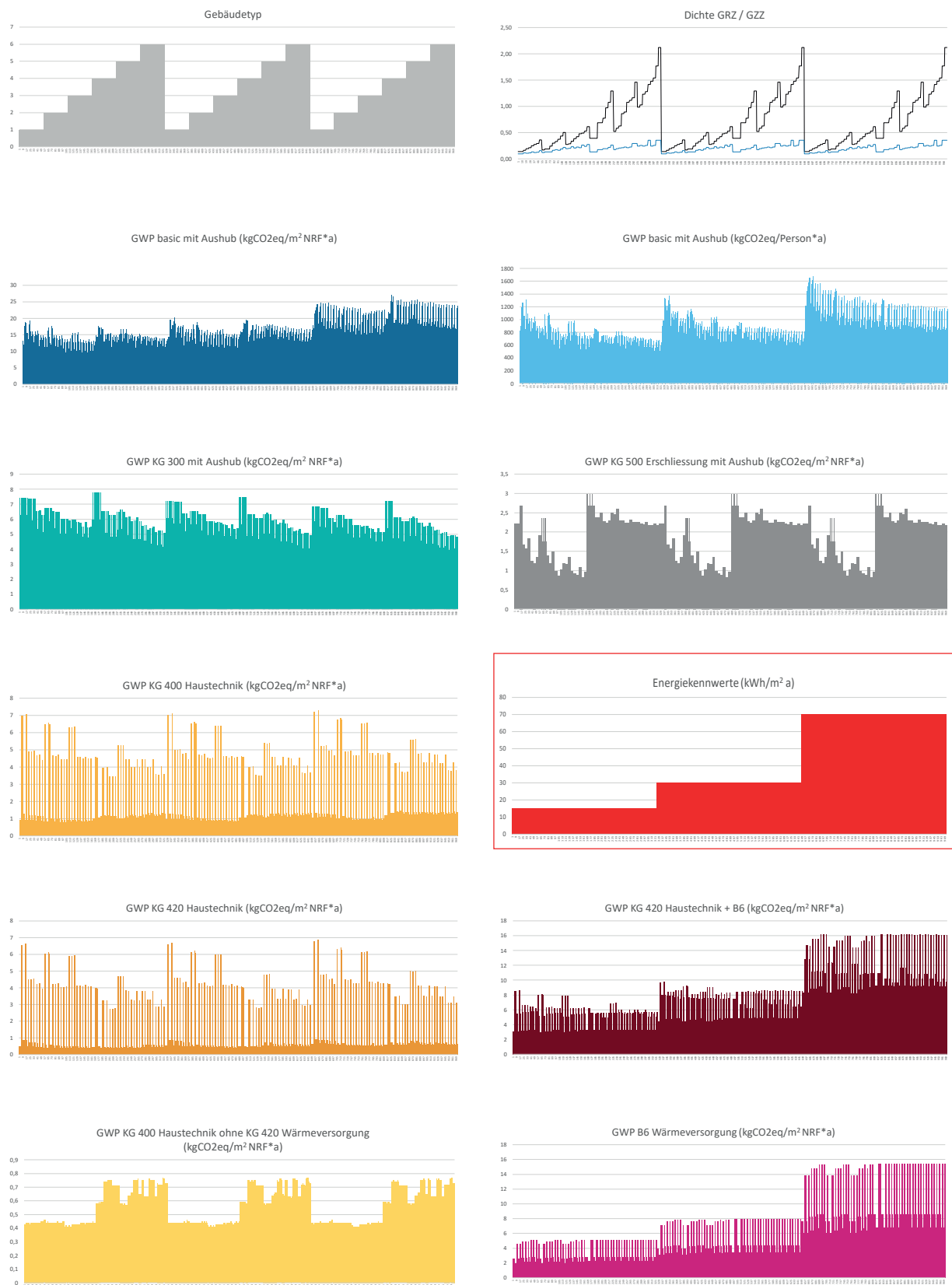
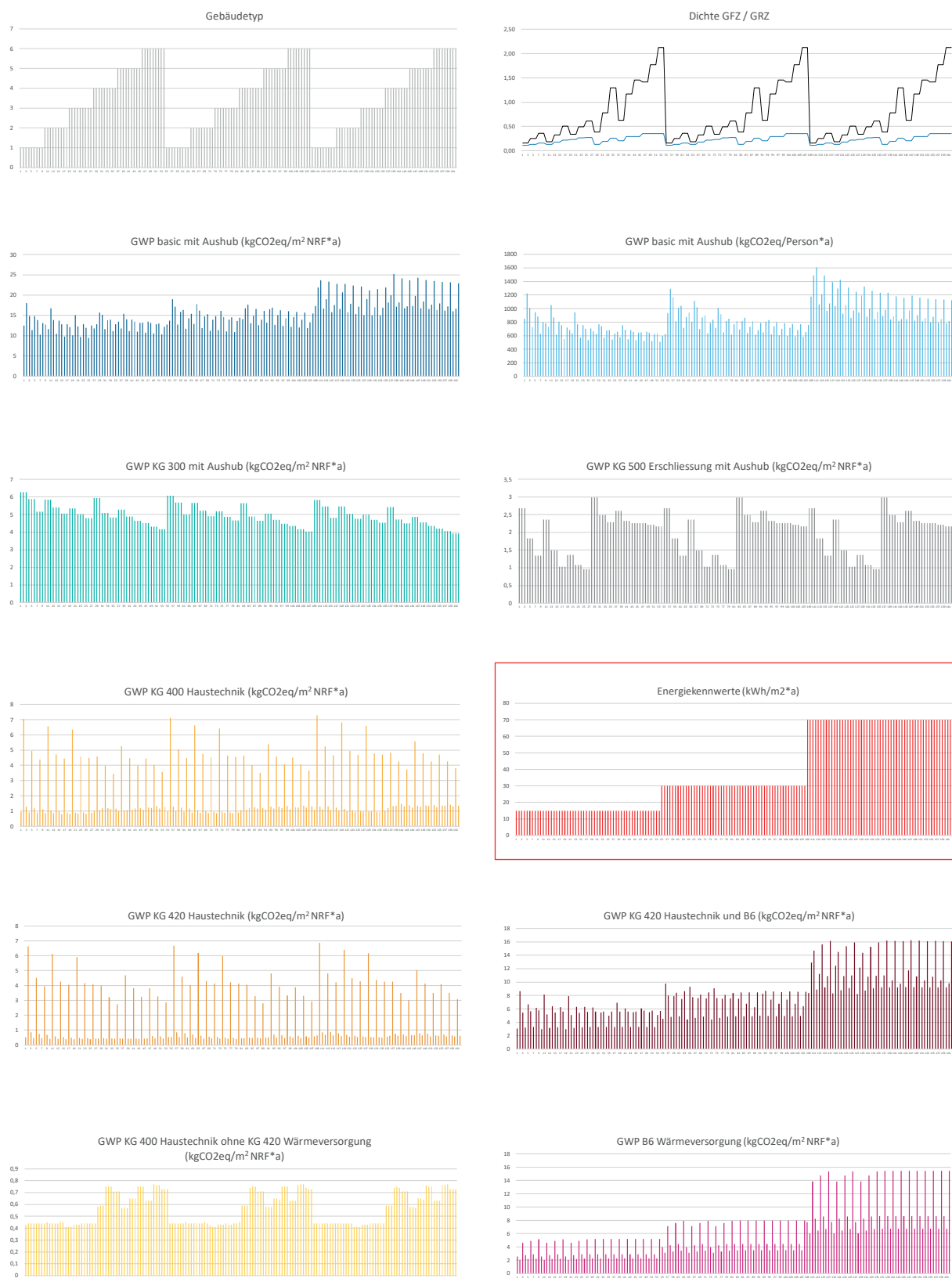
Abbildung 48:Auswertung aller 972 Varianten sortiert nach Energiekennwerten (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO₂eq/ m² NRF * a]

Abbildung 49:

Auswertung aller 162 Varianten sortiert nach Gebäudetypen und aufsteigender Dichtetyp (ohne Haushaltsstrom),
GWP in [kg CO₂eq/ m² NRF * a]



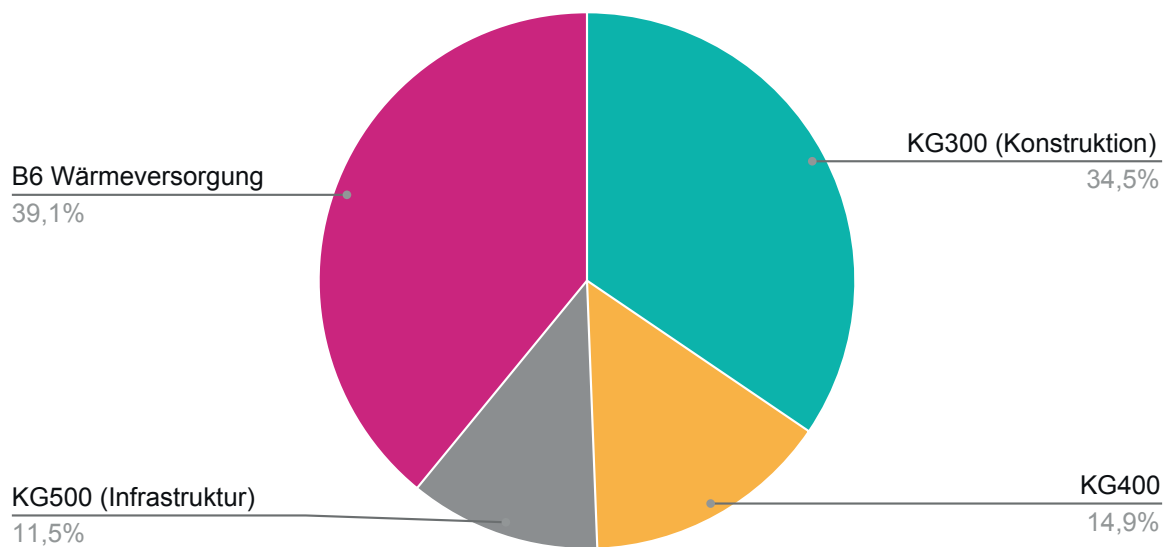
Abbildung 50:Auswertung aller 162 Varianten sortiert nach Energiekennwerten (ohne Haushaltsstrom), GWP in kg [CO₂eq/ m² NRF * a]

GWP-Anteil nach Kostengruppen

Die Verteilung des GWP-Anteils der Kostengruppen für das durchschnittliche flächenbezogene GWP aller 972 Varianten ist in Abbildung 51 dargestellt. Der größte Anteil entfällt mit 39,1 % auf die Betriebsenergie für die Wärmeversorgung. Mit 34,5 % entfällt mehr als ein Drittel des GWP auf die Gebäudekonstruktion (Kostengruppe 300) und 14,9 % auf die Gebäudetechnik (Kostengruppe 400). Die Siedlungsinfrastruktur (Kostengruppe 500) hat einen durchschnittlichen Anteil von 11,5 % am Siedlungs-GWP.

Abbildung 51:

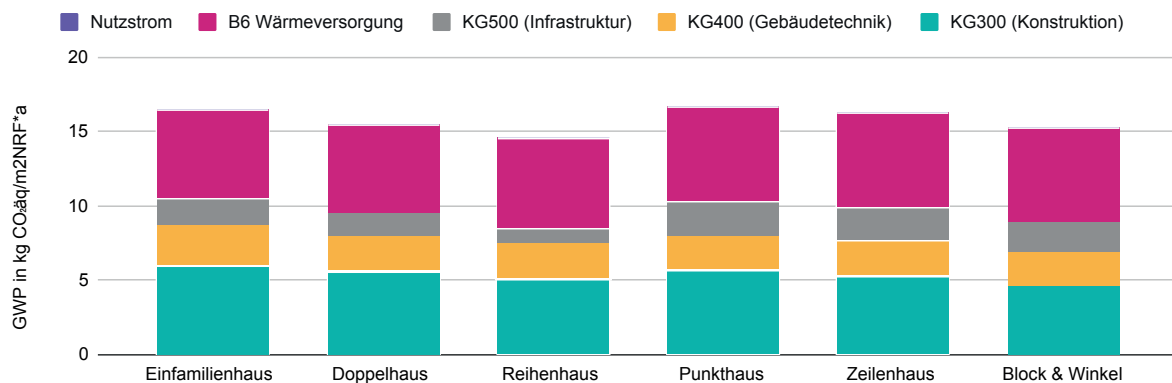
Anteil der Kostengruppen am GWP der Siedlungen im Mittelwert (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]



Der aus allen Siedlungsvarianten gebildete Mittelwert lässt sich differenzierter für die unterschiedlichen Gebäudetypen betrachten (Abbildung 52). Hier zeigt sich deutlich, dass der modellierte Reihentyp ein signifikant geringeres GWP im Infrastruktursektor aufweist als alle anderen Gebäudetypen. Die höheren GWP-Werte für die Infrastruktur der größeren Gebäudetypen ist vor allem auf den Einfluss der Tiefgaragen zurückzuführen (siehe Ergebnisbeschreibung in Kapitel 7.1.6).

Abbildung 52:

Verteilung des GWP auf die Kostengruppen differenziert nach den sechs Gebäudetypen im Mittelwert (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]



7.1.2 Auswertung von 54 Siedlungsvarianten

Eine weitere Engführung auf und der anschließende Vergleich von 54 Siedlungsvarianten zeigt den Einfluss der untersuchten Parameter noch deutlicher. Hierbei bleiben jene Parameter unberücksichtigt, deren Variation keinen oder nur einen geringen Einfluss auf das Gesamt-GWP haben - wie der Erschließungstyp -, oder die eine hohe Invarianz über alle Varianten hinweg aufzeigen - wie die Bauweise (Holz oder mineralisch). Im Weiteren wurden hier nur die Ergebnisse der Varianten in Holzbauweise mit Gittererschließung untersucht und hinsichtlich Siedlungsdichte, Wärmeversorgungssysteme und Energiekennwerte miteinander verglichen.

Die hierfür entwickelten Dashboards (Abbildungen 53 bis 62) zeigen jeweils oben rechts Liniengrafiken für das flächen- und personenbezogene GWP und links in Balkendiagrammen das anteilige Siedlungs-GWP für die Ausprägungen der Parameter Gebäudetyp, Siedlungsdichtetyp, Wärmeversorgungssystem und absolute städtebauliche Dichte (Siedlungs-GRZ und -GFZ). Unterhalb der Grafiken ist die dazugehörige Tabelle abgebildet, in denen das jeweilige flächen- und personenbezogene GWP für die drei Energiekennwerte 15, 30 und 70 kWh/m² *a bezogen auf die entsprechenden Siedlungsvariante (mit der Siedlungs-Kennnummer und deren Parameterausprägungen - Gebäudetyp, Wärmeversorgungssystem und Siedlungsdichtetyp) ausgewiesen ist. Aus der Tabelle lässt sich jeweils präzise ablesen, wie hoch die jeweils berechneten Werte sind. Für eine tiefer gehende Auswertung können die GWP bis auf Bauteilebene zurückverfolgt werden, um z.B. Optimierungen in der Planung vorzunehmen.

Die nachfolgenden Abbildungen 53 bis 62 zeigen einander gegenübergestellt Dashboards mit der Auswertung der untersuchten 54 Siedlungsvarianten, deren Ergebnisse gemäß folgenden Kriterien sortiert wurden:

- | | |
|---|--|
| ■ flächenbezogenes GWP min-max für
15 kWh Heizwärmebedarf
(Abbildung 53, Seite 104) | ■ personenbezogenes GWP min-max
für 15 kWh Heizwärmebedarf
(Abbildung 54, Seite 105) |
| ■ flächenbezogenes GWP min-max
für 30 kWh Heizwärmebedarf
(Abbildung 55, Seite 106) | ■ personenbezogenes GWP min-max
für 30 kWh Heizwärmebedarf
(Abbildung 56, Seite 107) |
| ■ flächenbezogenes GWP min-max
für 70 kWh Heizwärmebedarf
(Abbildung 57, Seite 108) | ■ personenbezogenes GWP min-max
für 70 kWh Heizwärmebedarf
(Abbildung 58, Seite 109) |
| ■ Gebäudetyp, aufsteigend
von Einfamilienhaus zu Block / Winkel
(Abbildung 59, Seite 110) | ■ Siedlungsdichtetyp, aufsteigend
gering, mittel, hoch
(Abbildung 60, Seite 111) |
| ■ Wärmeversorgungssystem
(Abbildung 61, Seite 112) | ■ GRZ / GFZ, aufsteigend nach absoluter Dichte
(Abbildung 62, Seite 113) |

Übereinstimmend zeigt sich deutlich für alle sechs Gebäudetypen, dass das geringste GWP mit höheren Siedlungsdichten und der Wärmeversorgungsvariante Luft-Wasser-Wärmepumpe zu erzielen ist. Die Ergebnisse für die Varianten mit den Energiekennwerten 15 und 30 kWh sind einander sehr ähnlich und liegen im Gesamt-GWP im niedrigsten Bereich zwischen ca. 9,5 und 11,8 kg CO₂ eq/m² NRF * a, bzw. bei 500 bis 600 kg pro Person, und im höchsten Bereich zwischen ca. 14 und 18 kg CO₂ eq/m² NRF * a, bzw. 800 und 1.200 kg pro Person. Bei den Indikatoren ist eine relativ hohe Übereinstimmung im Bereich der besten Siedlungsvarianten erkennbar, die signifikant durch die Wahl der Wärmeversorgungsanlagen beeinflusst werden.

Abbildung 53:

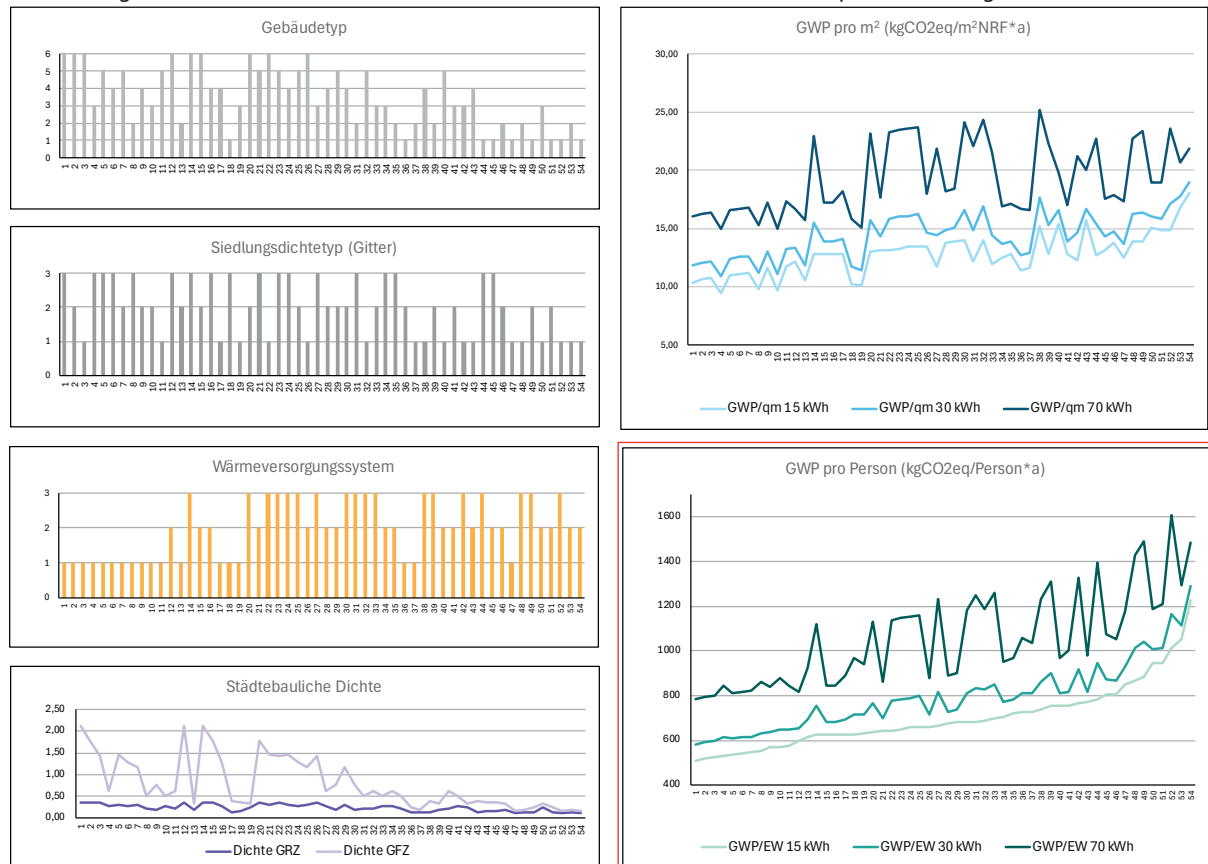
Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster / 15 kWh Heizwärme sortiert nach dem flächenbezogenen GWP min-max.



Opt.	Siedlungsvariante-Nr.:			Gebäudetyp	Versorgungssystem	Siedlungsdichtetyp	Städtebauliche Dichte		GWP pro m²			GWP pro Person		
	15 kWh	30 kWh	70 kWh				GRZ	GFZ	15 kWh	30 kWh	70 kWh	15 kWh	30 kWh	70 kWh
1	686	689	692	3 RH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,27	0,62	9,44	10,90	15,00	532	615	846
2	362	365	368	3 RH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,26	0,49	9,69	11,06	14,97	569	650	880
3	668	671	674	2 DH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,22	0,51	9,75	11,22	15,29	550	633	862
4	038	041	044	3 RH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,23	0,34	10,10	11,39	15,03	633	714	942
5	650	653	656	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,16	0,36	10,25	11,71	15,81	628	717	967
6	740	743	746	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,35	2,12	10,37	11,87	16,02	508	581	784
7	344	347	350	2 DH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,18	0,33	10,49	11,83	15,75	616	695	925
8	416	419	422	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,35	1,77	10,60	12,05	16,22	519	590	794
9	092	095	098	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,35	1,41	10,72	12,18	16,34	525	596	799
10	704	707	710	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,29	1,46	10,94	12,40	16,56	535	607	810
11	722	725	728	4 PH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,26	1,30	11,13	12,54	16,71	544	613	818
12	380	383	386	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,29	1,17	11,16	12,62	16,78	546	617	821
13	326	329	332	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,14	0,25	11,38	12,74	16,63	726	812	1060
14	020	023	026	2 DH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,19	11,63	12,89	16,55	729	808	1037
15	398	401	404	4 PH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,19	0,78	11,63	13,02	17,18	569	637	841
16	056	059	062	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,21	0,62	11,75	13,21	17,32	575	646	847
17	687	690	693	3 RH	3 Erdgas	3 Hoch	0,27	0,62	11,76	14,44	21,85	663	814	1232
18	363	366	369	3 RH	3 Erdgas	2 Mittel	0,26	0,49	11,92	14,47	21,49	701	850	1262
19	669	672	675	2 DH	3 Erdgas	3 Hoch	0,22	0,51	12,12	14,80	22,12	684	835	1248
20	739	742	745	6 B/W	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,35	2,12	12,16	13,34	16,65	595	653	815
21	039	042	045	3 RH	3 Erdgas	1 Gering	0,23	0,34	12,23	14,61	21,16	767	915	1326
22	002	005	008	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,11	0,16	12,48	13,69	17,31	849	931	1177
23	685	688	691	3 RH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,27	0,62	12,50	13,65	16,89	705	770	953
24	651	654	657	1 EFH	3 Erdgas	3 Hoch	0,16	0,36	12,75	15,41	22,76	780	943	1393
25	741	744	747	6 B/W	3 Erdgas	3 Hoch	0,35	2,12	12,76	15,48	22,91	624	757	1121
26	667	670	673	2 DH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,22	0,51	12,78	13,93	17,16	721	785	968
27	415	418	421	6 B/W	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,35	1,77	12,79	13,92	17,25	626	681	844
28	345	348	351	2 DH	3 Erdgas	2 Mittel	0,18	0,33	12,80	15,31	22,33	752	899	1312
29	074	077	080	4 PH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,39	12,81	14,12	18,22	627	691	892
30	721	724	727	4 PH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,26	1,30	12,82	13,92	17,25	627	681	844
31	361	364	367	3 RH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,26	0,49	12,83	13,91	17,02	754	817	1000
32	417	420	423	6 B/W	3 Erdgas	2 Mittel	0,35	1,77	13,01	15,68	23,12	636	767	1131
33	649	652	655	1 EFH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,16	0,36	13,13	14,27	17,53	803	873	1073
34	703	706	709	5 ZH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,29	1,46	13,15	14,29	17,61	643	699	861
35	093	096	099	6 B/W	3 Erdgas	1 Gering	0,35	1,41	13,16	15,84	23,27	644	775	1138
36	705	708	711	5 ZH	3 Erdgas	3 Hoch	0,29	1,46	13,24	16,03	23,45	648	784	1147
37	723	726	729	4 PH	3 Erdgas	3 Hoch	0,26	1,30	13,43	16,09	23,61	657	787	1155
38	381	384	387	5 ZH	3 Erdgas	2 Mittel	0,29	1,17	13,46	16,29	23,71	658	797	1160
39	091	094	097	6 B/W	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,35	1,41	13,47	14,60	17,93	659	715	877
40	343	346	349	2 DH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,18	0,33	13,73	14,78	17,90	807	868	1051
41	397	400	403	4 PH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,19	0,78	13,81	14,88	18,20	675	728	890
42	327	330	333	1 EFH	3 Erdgas	2 Mittel	0,14	0,25	13,83	16,35	23,35	882	1042	1489
43	021	024	027	2 DH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,19	13,84	16,20	22,77	867	1015	1427
44	379	382	385	5 ZH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,29	1,17	13,93	15,07	18,40	691	737	900
45	399	402	405	4 PH	3 Erdgas	2 Mittel	0,19	0,78	13,94	16,58	24,11	682	811	1180
46	057	060	063	5 ZH	3 Erdgas	1 Gering	0,21	0,62	14,04	16,92	24,29	687	828	1188
47	325	328	331	1 EFH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,14	0,25	14,82	15,87	18,97	945	1012	1210
48	003	006	009	1 EFH	3 Erdgas	1 Gering	0,11	0,16	14,86	17,16	23,63	1010	1167	1607
49	037	040	043	3 RH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,23	0,34	15,07	16,07	18,97	944	1007	1189
50	075	078	081	4 PH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,39	15,13	17,66	25,18	740	864	1232
51	055	058	061	5 ZH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,21	0,62	15,38	16,53	19,80	753	808	969
52	073	076	079	4 PH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,39	15,74	16,73	19,98	770	818	978
53	019	022	025	2 DH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,19	16,78	17,76	20,68	1051	1113	1296
54	001	004	007	1 EFH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,11	0,16	18,03	18,97	21,84	1226	1290	1485

Abbildung 54:

Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster / 15 kWh Heizwärme, sortiert nach dem personenbezogenen GWP min-max.



Opt.	Siedlungsvariante-Nr.:			Gebäudetyp	Versorgungssystem	Siedlungsdichtetyp	Städtebauliche Dichte		GWP pro m²			GWP pro Person		
	15 kWh	30 kWh	70 kWh				GRZ	GFZ	15 kWh	30 kWh	70 kWh	15 kWh	30 kWh	70 kWh
1	740	743	746	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,35	2,12	10,37	11,87	16,02	508	581	784
2	416	419	422	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,35	1,77	10,60	12,05	16,22	519	590	794
3	092	095	098	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,35	1,41	10,72	12,18	16,34	525	596	799
4	686	689	692	3 RH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,27	0,62	9,44	10,90	15,00	532	615	846
5	704	707	710	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,29	1,46	10,94	12,40	16,56	535	607	810
6	722	725	728	4 PH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,26	1,30	11,13	12,54	16,71	544	613	818
7	380	383	386	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,29	1,17	11,16	12,62	16,78	546	617	821
8	668	671	674	2 DH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,22	0,51	9,75	11,22	15,29	550	633	862
9	398	401	404	4 PH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,19	0,78	11,63	13,02	17,18	569	637	841
10	362	365	368	3 RH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,26	0,49	9,69	11,06	14,97	569	650	880
11	056	059	062	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,21	0,62	11,75	13,21	17,32	575	646	847
12	739	742	745	6 B/W	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,35	2,12	12,16	13,34	16,65	595	653	815
13	344	347	350	2 DH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,18	0,33	10,49	11,83	15,75	616	695	925
14	741	744	747	6 B/W	3 Erdgas	3 Hoch	0,35	2,12	12,76	15,48	22,91	624	757	1121
15	415	418	421	6 B/W	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,35	1,77	12,79	13,92	17,25	626	681	844
16	721	724	727	4 PH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,26	1,30	12,82	13,92	17,25	627	681	844
17	074	077	080	4 PH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,39	12,81	14,12	18,22	627	691	892
18	650	653	656	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,16	0,36	10,25	11,71	15,81	628	717	967
19	038	041	044	3 RH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,23	0,34	10,10	11,39	15,03	633	714	942
20	417	420	423	6 B/W	3 Erdgas	2 Mittel	0,35	1,77	13,01	15,68	23,12	636	767	1131
21	703	706	709	5 ZH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,29	1,46	13,15	14,29	17,61	643	699	861
22	093	096	099	6 B/W	3 Erdgas	1 Gering	0,35	1,41	13,16	15,84	23,27	644	775	1138
23	705	708	711	5 ZH	3 Erdgas	3 Hoch	0,29	1,46	13,24	16,03	23,45	648	784	1147
24	723	726	729	4 PH	3 Erdgas	3 Hoch	0,26	1,30	13,43	16,09	23,61	657	787	1155
25	381	384	387	5 ZH	3 Erdgas	2 Mittel	0,29	1,17	13,46	16,29	23,71	658	797	1160
26	091	094	097	6 B/W	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,35	1,41	13,47	14,60	17,93	659	715	877
27	687	690	693	3 RH	3 Erdgas	3 Hoch	0,27	0,62	11,76	14,44	21,85	663	814	1232
28	397	400	403	4 PH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,19	0,78	13,81	14,88	18,20	675	728	890
29	379	382	385	5 ZH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,29	1,17	13,93	15,07	18,40	681	737	900
30	399	402	405	4 PH	3 Erdgas	2 Mittel	0,19	0,78	13,94	16,58	24,11	682	811	1180
31	669	672	675	2 DH	3 Erdgas	3 Hoch	0,22	0,51	12,12	14,80	22,12	684	835	1248
32	057	060	063	5 ZH	3 Erdgas	1 Gering	0,21	0,62	14,04	16,92	24,29	687	828	1188
33	363	366	369	3 RH	3 Erdgas	2 Mittel	0,26	0,49	11,92	14,47	21,49	701	850	1262
34	685	688	691	3 RH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,27	0,62	12,50	13,65	16,89	705	770	953
35	667	670	673	2 DH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,22	0,51	12,78	13,93	17,16	721	785	968
36	326	329	332	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,14	0,25	11,38	12,74	16,63	726	812	1060
37	020	023	026	2 DH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,19	11,63	12,89	16,55	729	808	1037
38	075	078	081	4 PH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,39	15,13	17,66	25,18	740	864	1232
39	345	348	351	2 DH	3 Erdgas	2 Mittel	0,18	0,33	12,80	15,31	22,33	752	899	1312
40	055	058	061	5 ZH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,21	0,62	15,38	16,53	19,80	753	808	969
41	361	364	367	3 RH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,26	0,49	12,83	13,91	17,02	754	817	1000
42	039	042	045	3 RH	3 Erdgas	1 Gering	0,23	0,34	12,23	14,61	21,16	767	915	1326
43	073	076	079	4 PH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,39	15,74	18,73	19,98	770	818	978
44	651	654	657	1 EFH	3 Erdgas	3 Hoch	0,16	0,36	12,75	15,41	22,76	780	943	1393
45	649	652	655	1 EFH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,16	0,36	13,13	14,27	17,53	803	873	1073
46	343	346	349	2 DH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,18	0,33	13,73	14,78	17,90	807	868	1051
47	002	005	008	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,11	0,16	12,48	13,69	17,31	849	931	1177
48	021	024	027	2 DH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,19	13,84	16,20	22,77	867	1015	1427
49	327	330	333	1 EFH	3 Erdgas	2 Mittel	0,14	0,25	13,83	16,35	23,35	882	1042	1489
50	037	040	043	3 RH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,23	0,34	15,07	16,07	18,97	944	1007	1189
51	325	328	331	1 EFH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,14	0,25	14,82	15,87	18,97	945	1012	1210
52	003	006	009	1 EFH	3 Erdgas	1 Gering	0,11	0,16	14,86	17,16	23,63	1010	1167	1607
53	019	022	025	2 DH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,19	16,78	17,76	20,68	1051	1113	1296
54	001	004	007	1 EFH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,11	0,16	18,03	18,97	21,84	1226	1290	1485

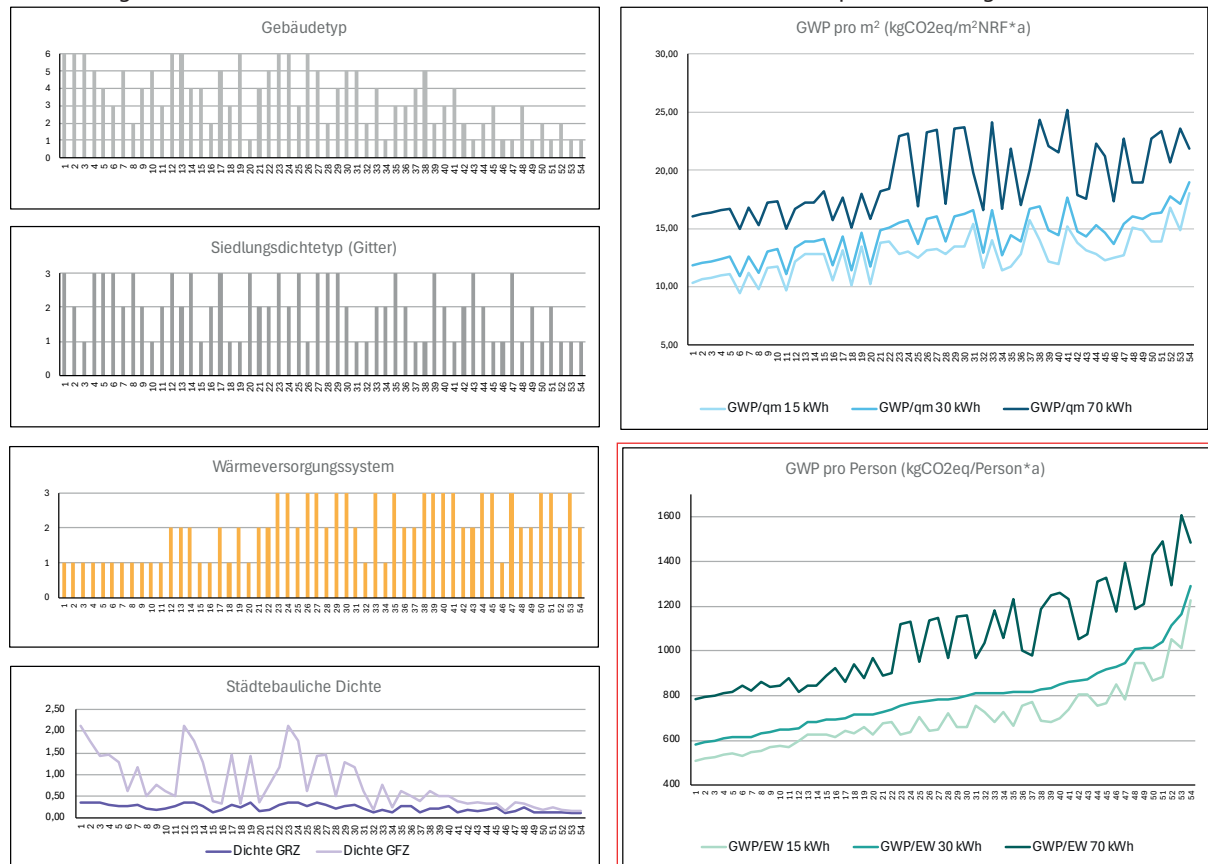
Abbildung 55:

Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster / 30 kWh Heizwärme, sortiert nach dem flächenbezogenen GWP min-max.



Abbildung 56:

Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster / 30 kWh Heizwärme, sortiert nach dem personenbezogenen GWP min-max.



Opt.	Siedlungsvariante-Nr.:			Gebäudetyp	Versorgungssystem	Siedlungsdichtetyp	Städtebauliche Dichte		GWP pro m²			GWP pro Person		
	15 kWh	30 kWh	70 kWh				GRZ	GFZ	15 kWh	30 kWh	70 kWh	15 kWh	30 kWh	70 kWh
1	740	743	746	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,35	2,12	10,37	11,87	16,02	508	581	784
2	416	419	422	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,35	1,77	10,60	12,05	16,22	519	590	794
3	092	095	098	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,35	1,41	10,72	12,18	16,34	525	596	799
4	704	707	710	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,29	1,46	10,94	12,40	16,56	535	607	810
5	722	725	728	4 PH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,26	1,30	11,13	12,54	16,71	544	613	818
6	686	689	692	3 RH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,27	0,62	9,44	10,90	15,00	532	615	846
7	380	383	386	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,29	1,17	11,16	12,62	16,78	546	617	821
8	668	671	674	2 DH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,22	0,51	9,75	11,22	15,29	550	633	862
9	398	401	404	4 PH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,19	0,78	11,63	13,02	17,18	569	637	841
10	056	059	062	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,21	0,62	11,75	13,21	17,32	575	646	847
11	362	365	368	3 RH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,26	0,49	9,69	11,06	14,97	569	650	880
12	739	742	745	6 B/W	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,35	2,12	12,16	13,34	16,65	595	653	815
13	415	418	421	6 B/W	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,35	1,77	12,79	13,92	17,25	626	681	844
14	721	724	727	4 PH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,26	1,30	12,82	13,92	17,25	627	681	844
15	074	077	080	4 PH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,39	12,81	14,12	18,22	627	691	892
16	344	347	350	2 DH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,18	0,33	10,49	11,83	15,75	616	695	925
17	703	706	709	5 ZH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,29	1,46	13,15	14,29	17,61	643	699	861
18	038	041	044	3 RH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,23	0,34	10,10	11,39	15,03	633	714	942
19	091	094	097	6 B/W	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,35	1,41	13,47	14,60	17,93	659	715	877
20	650	653	656	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,16	0,36	10,25	11,71	15,81	628	717	967
21	397	400	403	4 PH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,19	0,78	13,81	14,88	18,20	675	728	890
22	379	382	385	5 ZH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,29	1,17	13,93	15,07	18,40	681	737	900
23	741	744	747	6 B/W	3 Erdgas	3 Hoch	0,35	2,12	12,76	15,48	22,91	624	757	1121
24	417	420	423	6 B/W	3 Erdgas	2 Mittel	0,35	1,77	13,01	15,68	23,12	636	767	1131
25	685	688	691	3 RH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,27	0,62	12,50	13,65	16,89	705	770	953
26	093	096	099	6 B/W	3 Erdgas	1 Gering	0,35	1,41	13,16	15,84	23,27	644	775	1138
27	705	708	711	5 ZH	3 Erdgas	3 Hoch	0,29	1,46	13,24	16,03	23,45	648	784	1147
28	667	670	673	2 DH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,22	0,51	12,78	13,93	17,16	721	785	968
29	723	726	729	4 PH	3 Erdgas	3 Hoch	0,26	1,30	13,43	16,09	23,61	657	787	1155
30	381	384	387	5 ZH	3 Erdgas	2 Mittel	0,29	1,17	13,46	16,29	23,71	658	797	1160
31	055	058	061	5 ZH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,21	0,62	15,38	16,53	19,80	753	808	969
32	020	023	026	2 DH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,19	11,63	12,89	16,55	729	808	1037
33	399	402	405	4 PH	3 Erdgas	2 Mittel	0,19	0,78	13,94	16,58	24,11	682	811	1180
34	326	329	332	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,14	0,25	11,38	12,74	16,63	726	812	1060
35	687	690	693	3 RH	3 Erdgas	3 Hoch	0,27	0,62	11,76	14,44	21,85	663	814	1232
36	361	364	367	3 RH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,26	0,49	12,83	13,91	17,02	754	817	1000
37	073	076	079	4 PH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,39	15,74	16,73	19,98	770	818	978
38	057	060	063	5 ZH	3 Erdgas	1 Gering	0,21	0,62	14,04	16,92	24,29	687	828	1188
39	669	672	675	2 DH	3 Erdgas	3 Hoch	0,22	0,51	12,12	14,80	22,12	684	835	1248
40	363	366	369	3 RH	3 Erdgas	2 Mittel	0,26	0,49	11,92	14,47	21,49	701	850	1262
41	075	078	081	4 PH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,39	15,13	17,66	25,18	740	864	1232
42	343	346	349	2 DH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,18	0,33	13,73	14,78	17,90	807	868	1051
43	649	652	655	1 EFH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,16	0,36	13,13	14,27	17,53	803	873	1072
44	345	348	351	2 DH	3 Erdgas	2 Mittel	0,18	0,33	12,80	15,31	22,33	752	899	1212
45	039	042	045	3 RH	3 Erdgas	1 Gering	0,23	0,34	12,23	14,61	21,16	767	915	1326
46	002	005	008	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,11	0,16	12,48	13,69	17,31	849	931	1177
47	651	654	657	1 EFH	3 Erdgas	3 Hoch	0,16	0,36	12,75	15,41	22,76	780	943	1393
48	037	040	043	3 RH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,23	0,34	15,07	16,07	18,97	944	1007	1189
49	325	328	331	1 EFH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,14	0,25	14,82	15,87	18,97	945	1012	1210
50	021	024	027	2 DH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,19	13,84	16,20	22,77	867	1015	1427
51	327	330	333	1 EFH	3 Erdgas	2 Mittel	0,14	0,25	13,83	16,35	23,35	882	1042	1489
52	019	022	025	2 DH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,19	16,78	17,76	20,68	1051	1113	1296
53	003	006	009	1 EFH	3 Erdgas	1 Gering	0,11	0,16	14,86	17,16	23,63	1010	1167	1607
54	001	004	007	1 EFH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,11	0,16	18,03	18,97	21,84	1226	1290	1485

Abbildung 57:

Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster / 70 kWh Heizwärme, sortiert nach dem flächenbezogenen GWP min-max.

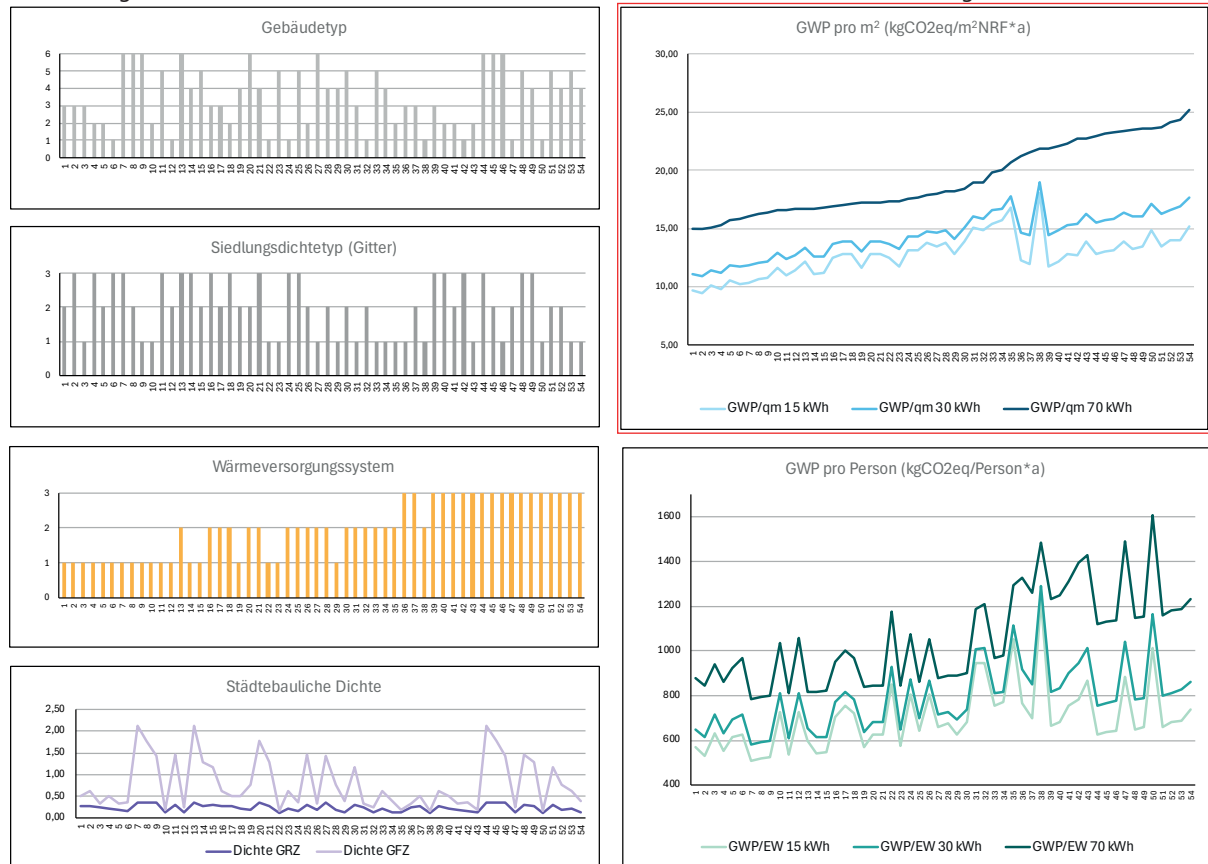


Abbildung 58:

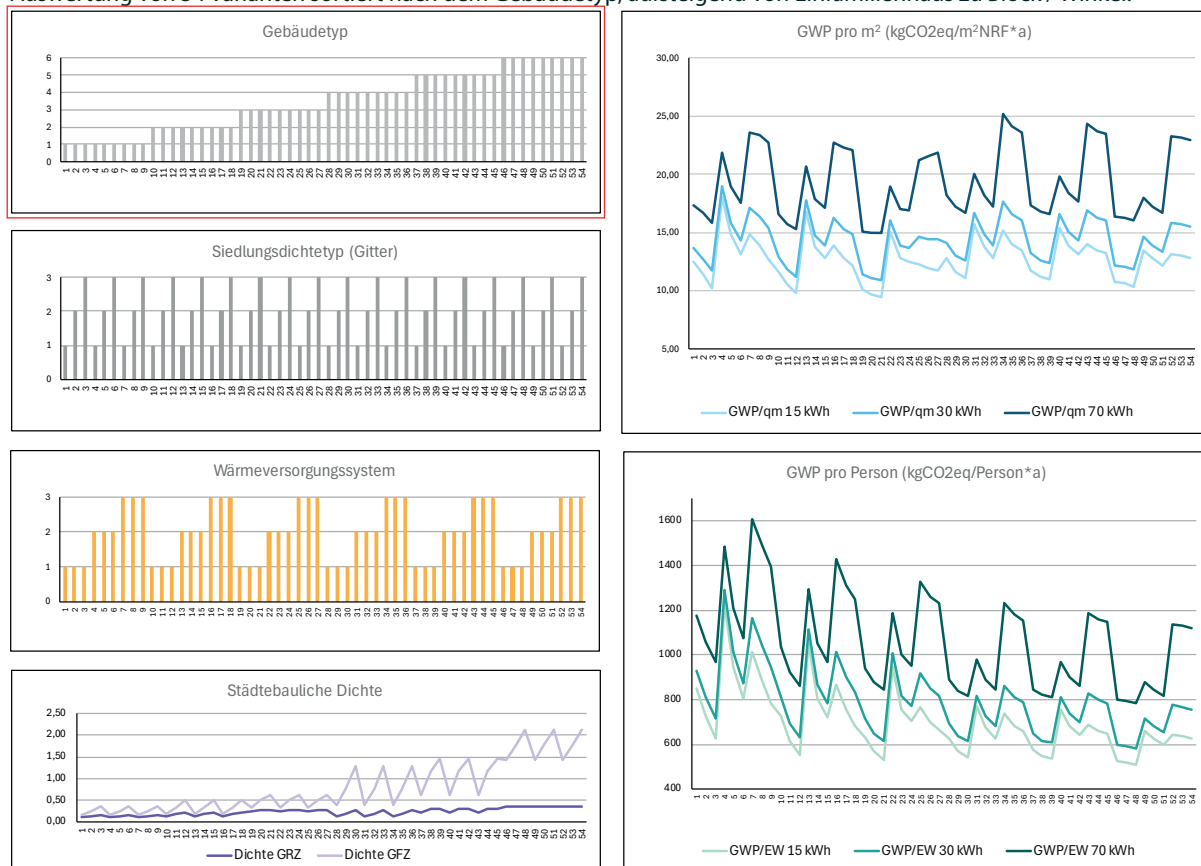
Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster / 70 kWh Heizwärme, sortiert nach dem personenbezogenen GWP min-max.



Opt.	Siedlungsvariante-Nr.:			Gebäudetyp	Versorgungssystem	Siedlungsdichtetyp	Städtebauliche Dichte		GWP pro m²			GWP pro Person		
	15 kWh	30 kWh	70 kWh				GRZ	GFZ	15 kWh	30 kWh	70 kWh	15 kWh	30 kWh	70 kWh
1	740	743	746	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,35	2,12	10,37	11,87	16,02	508	581	784
2	416	419	422	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,35	1,77	10,60	12,05	16,22	519	590	794
3	092	095	098	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,35	1,41	10,72	12,18	16,34	525	596	799
4	704	707	710	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,29	1,46	10,94	12,40	16,56	535	607	810
5	739	742	745	6 B/W	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,35	2,12	12,16	13,34	16,65	595	653	815
6	722	725	728	4 PH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,26	1,30	11,13	12,54	16,71	544	613	818
7	380	383	386	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,29	1,17	11,16	12,62	16,78	546	617	821
8	398	401	404	4 PH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,19	0,78	11,63	13,02	17,18	569	637	841
9	721	724	727	4 PH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,26	1,30	12,82	13,92	17,25	627	681	844
10	415	418	421	6 B/W	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,35	1,77	12,79	13,92	17,25	626	681	844
11	686	689	692	3 RH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,27	0,62	9,44	10,90	15,00	532	615	846
12	056	059	062	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,21	0,62	11,75	13,21	17,32	575	646	847
13	703	706	709	5 ZH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,29	1,46	13,15	14,29	17,61	643	699	861
14	668	671	674	2 DH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,22	0,51	9,75	11,22	15,29	550	633	862
15	091	094	097	6 B/W	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,35	1,41	13,47	14,60	17,93	659	715	877
16	362	365	368	3 RH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,26	0,49	9,69	11,06	14,97	569	650	880
17	397	400	403	4 PH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,19	0,78	13,81	14,88	18,20	675	728	890
18	074	077	080	4 PH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,39	12,81	14,12	18,22	627	691	892
19	379	382	385	5 ZH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,29	1,17	13,93	15,07	18,40	681	737	900
20	344	347	350	2 DH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,18	0,33	10,49	11,83	15,75	616	695	925
21	038	041	044	3 RH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,23	0,34	10,10	11,39	15,03	633	714	942
22	685	688	691	3 RH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,27	0,62	12,50	13,65	16,89	705	770	953
23	650	653	656	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,16	0,36	10,25	11,71	15,81	628	717	967
24	667	670	673	2 DH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,22	0,51	12,78	13,93	17,16	721	785	968
25	055	058	061	5 ZH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,21	0,62	15,38	16,53	19,80	753	808	969
26	073	076	079	4 PH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,39	15,74	16,73	19,98	770	818	978
27	361	364	367	3 RH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,26	0,49	12,83	13,91	17,02	754	817	1000
28	020	023	026	2 DH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,19	11,63	12,89	16,55	729	806	1037
29	343	346	349	2 DH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,18	0,33	13,73	14,78	17,90	807	868	1051
30	326	329	332	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,14	0,25	11,38	12,74	16,63	726	812	1060
31	649	652	655	1 EFH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,16	0,36	13,13	14,27	17,53	803	873	1073
32	741	744	747	6 B/W	3 Erdgas	3 Hoch	0,35	2,12	12,76	15,48	22,91	624	757	1121
33	417	420	423	6 B/W	3 Erdgas	2 Mittel	0,35	1,77	13,01	15,68	23,12	636	767	1131
34	093	096	099	6 B/W	3 Erdgas	1 Gering	0,35	1,41	13,16	15,84	23,27	644	775	1138
35	705	708	711	5 ZH	3 Erdgas	3 Hoch	0,29	1,46	13,24	16,03	23,45	648	784	1147
36	723	726	729	4 PH	3 Erdgas	3 Hoch	0,26	1,30	13,43	16,09	23,61	657	787	1155
37	381	384	387	5 ZH	3 Erdgas	2 Mittel	0,29	1,17	13,46	16,29	23,71	658	797	1160
38	002	005	008	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,11	0,16	12,48	13,69	17,31	849	931	1177
39	399	402	405	4 PH	3 Erdgas	2 Mittel	0,19	0,78	13,94	16,58	24,11	682	811	1180
40	057	060	063	5 ZH	3 Erdgas	1 Gering	0,21	0,62	14,04	16,92	24,29	687	828	1188
41	037	040	043	3 RH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,23	0,34	15,07	16,07	18,97	944	1007	1189
42	325	328	331	1 EFH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,14	0,25	14,82	15,87	18,97	945	1012	1210
43	687	690	693	3 RH	3 Erdgas	3 Hoch	0,27	0,62	11,76	14,44	21,85	663	814	1232
44	075	078	081	4 PH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,39	15,13	17,66	25,18	740	864	1232
45	669	672	675	2 DH	3 Erdgas	3 Hoch	0,22	0,51	12,12	14,80	22,12	684	835	1248
46	363	366	369	3 RH	3 Erdgas	2 Mittel	0,26	0,49	11,92	14,47	21,49	701	850	1262
47	019	022	025	2 DH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,19	16,78	17,76	20,68	1051	1113	1296
48	345	348	351	2 DH	3 Erdgas	2 Mittel	0,18	0,33	12,80	15,31	22,33	752	899	1312
49	039	042	045	3 RH	3 Erdgas	1 Gering	0,23	0,34	12,23	14,61	21,16	767	915	1326
50	651	654	657	1 EFH	3 Erdgas	3 Hoch	0,16	0,36	12,75	15,41	22,76	780	943	1393
51	021	024	027	2 DH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,19	13,84	16,20	22,77	867	1015	1427
52	001	004	007	1 EFH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,11	0,16	18,03	18,97	21,84	1226	1290	1485
53	327	330	333	1 EFH	3 Erdgas	2 Mittel	0,14	0,25	13,83	16,35	23,35	882	1042	1489
54	003	006	009	1 EFH	3 Erdgas	1 Gering	0,11	0,16	14,86	17,16	23,63	1010	1167	1607

Abbildung 59:

Auswertung von 54 Varianten sortiert nach dem Gebäudetyp, aufsteigend von Einfamilienhaus zu Block / Winkel.



Opt.	Siedlungsvariante-Nr.:			Gebäudetyp	Versorgungssystem	Siedlungsdichtetyp	Städtebauliche Dichte		GWP pro m ²			GWP pro Person		
	15 kWh	30 kWh	70 kWh				GRZ	GFZ	15 kWh	30 kWh	70 kWh	15 kWh	30 kWh	70 kWh
1	002	005	008	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,11	0,16	12,48	13,69	17,31	849	931	1177
2	326	329	332	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,14	0,25	11,38	12,74	16,63	726	812	1060
3	650	653	656	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,16	0,36	10,25	11,71	15,81	628	717	967
4	001	004	007	1 EFH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,11	0,16	18,03	18,97	21,84	1226	1290	1485
5	325	328	331	1 EFH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,14	0,25	14,82	15,87	18,97	945	1012	1210
6	649	652	655	1 EFH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,16	0,36	13,13	14,27	17,53	803	873	1073
7	003	006	009	1 EFH	3 Erdgas	1 Gering	0,11	0,16	14,86	17,16	23,63	1010	1167	1607
8	327	330	333	1 EFH	3 Erdgas	2 Mittel	0,14	0,25	13,83	16,35	23,35	882	1042	1489
9	651	654	657	1 EFH	3 Erdgas	3 Hoch	0,16	0,36	12,75	15,41	22,76	780	943	1393
10	020	023	026	2 DH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,19	13,63	12,89	16,55	729	808	1037
11	344	347	350	2 DH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,18	0,33	10,49	11,83	15,75	616	695	925
12	668	671	674	2 DH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,22	0,51	9,75	11,22	15,29	550	633	862
13	019	022	025	2 DH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,19	16,78	17,76	20,68	1051	1113	1296
14	343	346	349	2 DH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,18	0,33	13,73	14,78	17,90	807	868	1051
15	667	670	673	2 DH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,22	0,51	12,78	13,93	17,16	721	785	968
16	021	024	027	2 DH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,19	13,84	16,20	22,77	867	1015	1427
17	345	348	351	2 DH	3 Erdgas	2 Mittel	0,18	0,33	12,80	15,31	22,33	752	899	1312
18	669	672	675	2 DH	3 Erdgas	3 Hoch	0,22	0,51	12,12	14,80	22,12	684	835	1248
19	038	041	044	3 RH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,23	0,34	10,10	11,39	15,03	633	714	942
20	362	365	368	3 RH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,26	0,49	9,69	11,06	14,97	569	650	880
21	686	689	692	3 RH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,27	0,62	9,44	10,90	15,00	532	615	846
22	037	040	043	3 RH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,23	0,34	15,07	16,07	18,97	944	1007	1189
23	361	364	367	3 RH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,26	0,49	12,83	13,91	17,02	754	817	1000
24	685	688	691	3 RH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,27	0,62	12,50	13,65	16,89	705	770	953
25	039	042	045	3 RH	3 Erdgas	1 Gering	0,23	0,34	12,23	14,61	21,16	767	915	1326
26	363	366	369	3 RH	3 Erdgas	2 Mittel	0,26	0,49	11,92	14,47	21,49	701	850	1262
27	687	690	693	3 RH	3 Erdgas	3 Hoch	0,27	0,62	11,76	14,44	21,85	663	814	1232
28	074	077	080	4 PH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,39	12,81	14,12	18,22	627	691	892
29	398	401	404	4 PH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,19	0,78	11,63	13,02	17,18	569	637	841
30	722	725	728	4 PH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,26	1,30	11,13	12,54	16,71	544	613	818
31	073	076	079	4 PH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,39	15,74	16,73	19,98	770	818	978
32	397	400	403	4 PH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,19	0,78	13,81	14,88	18,20	675	728	890
33	721	724	727	4 PH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,26	1,30	12,82	13,92	17,25	627	681	844
34	075	078	081	4 PH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,39	15,13	17,66	25,18	740	864	1232
35	399	402	405	4 PH	3 Erdgas	2 Mittel	0,19	0,78	13,94	16,58	24,11	682	811	1180
36	723	726	729	4 PH	3 Erdgas	3 Hoch	0,26	1,30	13,43	16,09	23,61	657	787	1155
37	056	059	062	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,21	0,62	11,75	13,21	17,32	575	646	847
38	380	383	386	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,29	1,17	11,16	12,62	16,78	546	617	821
39	704	707	710	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,29	1,46	10,94	12,40	16,56	535	607	810
40	055	058	061	5 ZH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,21	0,62	15,38	16,53	19,80	753	808	969
41	379	382	385	5 ZH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,29	1,17	13,93	15,07	18,40	681	737	900
42	703	706	709	5 ZH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,29	1,46	13,15	14,29	17,61	643	699	861
43	057	060	063	5 ZH	3 Erdgas	1 Gering	0,21	0,62	14,04	16,92	24,29	687	828	1188
44	381	384	387	5 ZH	3 Erdgas	2 Mittel	0,29	1,17	13,46	16,29	23,71	658	797	1160
45	705	708	711	5 ZH	3 Erdgas	3 Hoch	0,29	1,46	13,24	16,03	23,45	648	784	1147
46	092	095	098	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,35	1,41	10,72	12,18	16,34	525	596	799
47	416	419	422	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,35	1,77	10,60	12,05	16,22	519	590	794
48	740	743	746	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,35	2,12	10,37	11,87	16,02	508	581	784
49	091	094	097	6 B/W	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,35	1,41	13,47	14,60	17,93	659	715	877
50	415	418	421	6 B/W	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,35	1,77	12,79	13,92	17,25	626	681	844
51	739	742	745	6 B/W	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,35	2,12	12,16	13,34	16,65	595	653	815
52	093	096	099	6 B/W	3 Erdgas	1 Gering	0,35	1,41	13,16	15,84	23,27	644	775	1138
53	417	420	423	6 B/W	3 Erdgas	2 Mittel	0,35	1,77	13,01	15,68	23,12	636	767	1131
54	741	744	747	6 B/W	3 Erdgas	3 Hoch	0,35	2,12	12,76	15,48	22,91	624	757	1121

Abbildung 60:

Auswertung von 54 Varianten sortiert nach dem Siedlungsdichtetyp, aufsteigend gering, mittel, hoch.

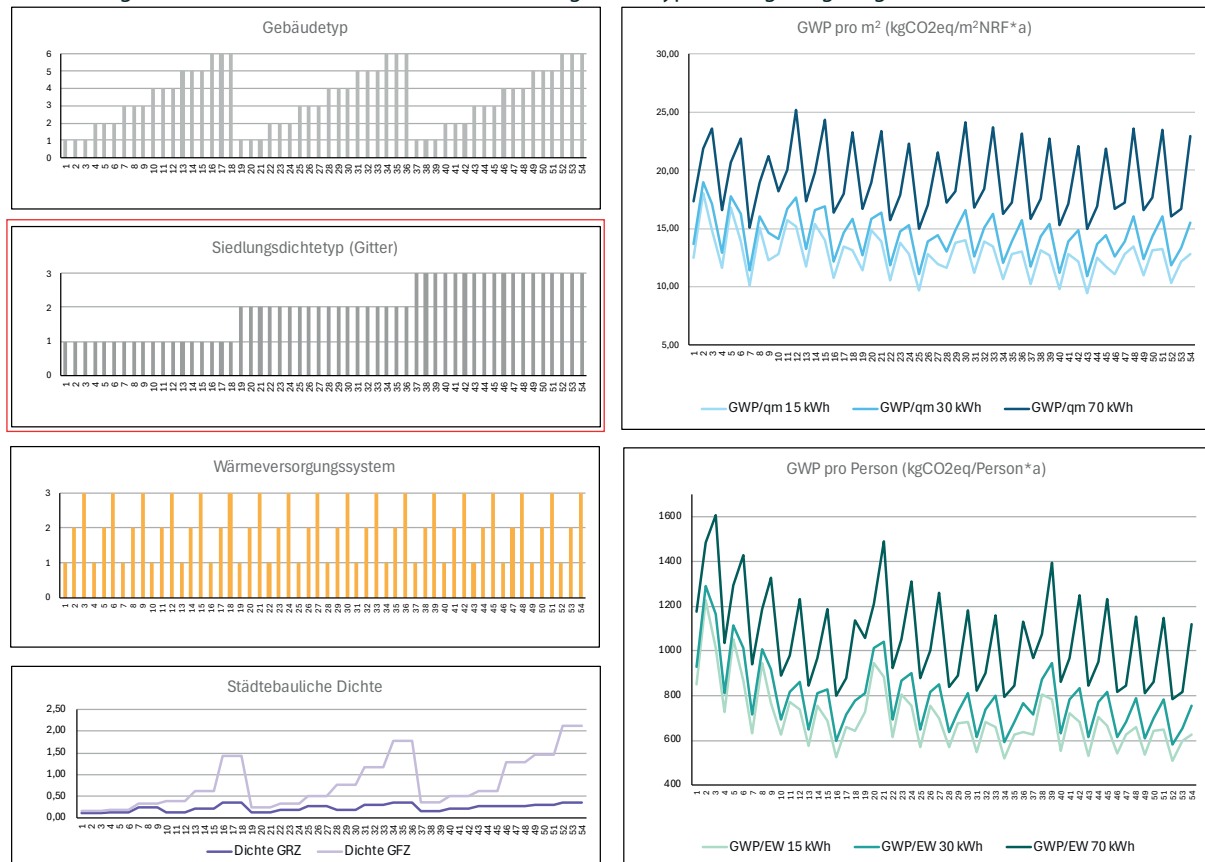


Abbildung 61:

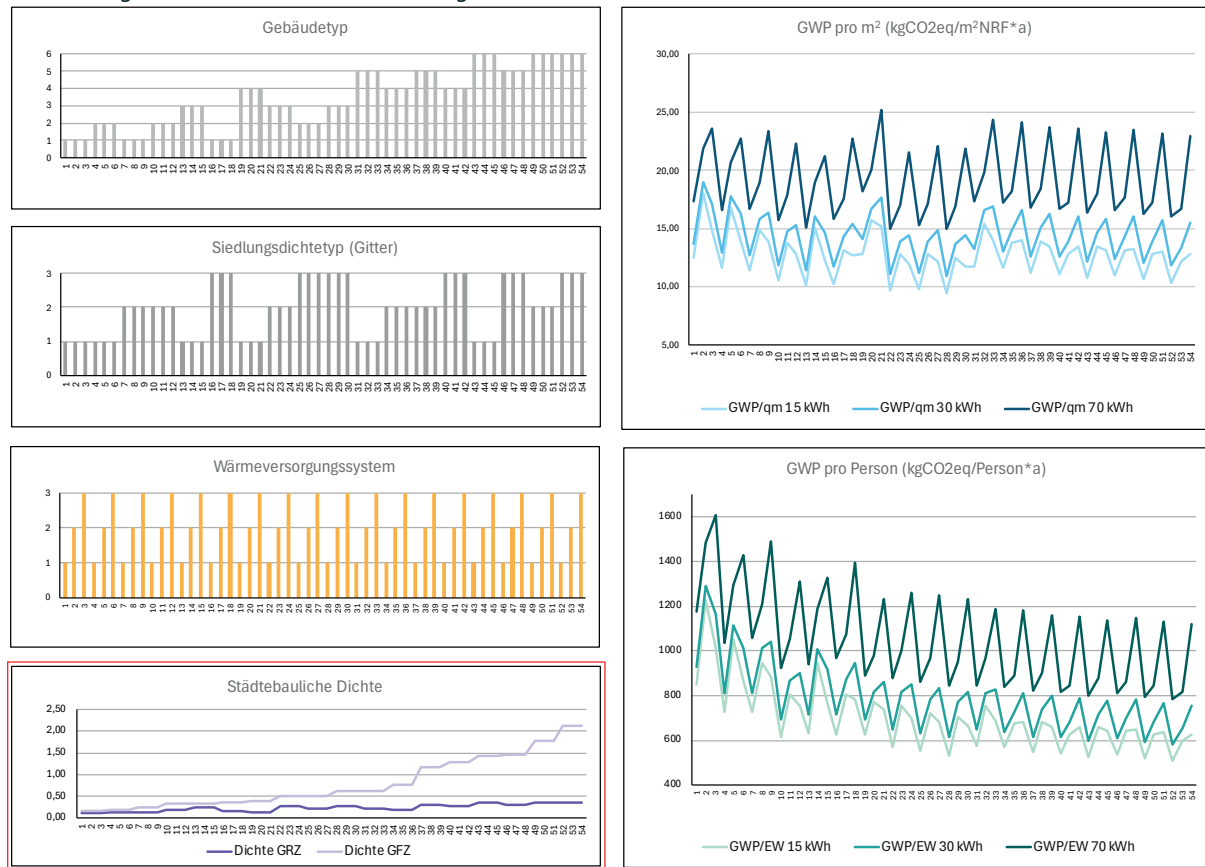
Auswertung von 54 Varianten sortiert nach dem Wärmeversorgungssystem.



Opt.	Siedlungsvariante-Nr.:			Gebäudetyp	Versorgungssystem	Siedlungsdichtetyp	Städtebauliche Dichte		GWP pro m²			GWP pro Person		
	15 kWh	30 kWh	70 kWh				GRZ	GFZ	15 kWh	30 kWh	70 kWh	15 kWh	30 kWh	70 kWh
1	002	005	008	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,11	0,16	12,48	13,69	17,31	849	931	1177
2	326	329	332	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,14	0,25	11,38	12,74	16,63	726	812	1060
3	650	653	656	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,16	0,36	10,25	11,71	15,81	628	717	967
4	020	023	026	2 DH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,19	11,63	12,89	16,55	729	808	1037
5	344	347	350	2 DH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,18	0,33	10,49	11,83	15,75	616	695	925
6	668	671	674	2 DH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,22	0,51	9,75	11,22	15,29	550	633	862
7	038	041	044	3 RH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,23	0,34	10,10	11,39	15,03	633	714	942
8	362	365	368	3 RH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,26	0,49	9,69	11,06	14,97	569	650	880
9	686	689	692	3 RH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,27	0,62	9,44	10,90	15,00	532	615	846
10	074	077	080	4 PH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,39	12,81	14,12	18,22	627	691	892
11	398	401	404	4 PH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,19	0,78	11,63	13,02	17,18	569	637	841
12	722	725	728	4 PH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,26	1,30	11,13	12,54	16,71	544	613	818
13	056	059	062	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,21	0,62	11,75	13,21	17,32	575	646	847
14	380	383	386	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,29	1,17	11,16	12,62	16,78	546	617	821
15	704	707	710	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,29	1,46	10,94	12,40	16,56	535	607	810
16	092	095	098	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,35	1,41	10,72	12,18	16,34	525	596	799
17	416	419	422	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,35	1,77	10,60	12,05	16,22	519	590	794
18	740	743	746	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,35	2,12	10,37	11,87	16,02	508	581	784
19	001	004	007	1 EFH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,11	0,16	18,03	18,97	21,84	1226	1290	1485
20	325	328	331	1 EFH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,14	0,25	14,82	15,87	18,97	945	1012	1210
21	649	652	655	1 EFH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,16	0,36	13,13	14,27	17,53	803	873	1073
22	019	022	025	2 DH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,19	16,78	17,76	20,68	1051	1113	1296
23	343	346	349	2 DH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,18	0,33	13,73	14,78	17,90	807	868	1051
24	667	670	673	2 DH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,22	0,51	12,78	13,93	17,16	721	785	968
25	037	040	043	3 RH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,23	0,34	15,07	16,07	18,97	944	1007	1189
26	361	364	367	3 RH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,26	0,49	12,83	13,91	17,02	754	817	1000
27	685	688	691	3 RH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,27	0,62	12,50	13,65	16,89	705	770	953
28	073	076	079	4 PH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,39	15,74	16,73	19,98	770	818	978
29	397	400	403	4 PH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,19	0,78	13,81	14,88	18,20	675	728	890
30	721	724	727	4 PH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,26	1,30	12,82	13,92	17,25	627	681	844
31	055	058	061	5 ZH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,21	0,62	15,38	16,53	19,80	753	808	969
32	379	382	385	5 ZH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,29	1,17	13,93	15,07	18,40	681	737	900
33	703	706	709	5 ZH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,29	1,46	13,15	14,29	17,61	643	699	861
34	091	094	097	6 B/W	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,35	1,41	13,47	14,60	17,93	659	715	877
35	415	418	421	6 B/W	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,35	1,77	12,79	13,92	17,25	626	681	844
36	739	742	745	6 B/W	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,35	2,12	12,16	13,34	16,65	595	653	815
37	003	006	009	1 EFH	3 Erdgas	1 Gering	0,11	0,16	14,86	17,16	23,63	1010	1167	1607
38	327	330	333	1 EFH	3 Erdgas	2 Mittel	0,14	0,25	13,83	16,35	23,35	882	1042	1489
39	651	654	657	1 EFH	3 Erdgas	3 Hoch	0,16	0,36	12,75	15,41	22,76	780	943	1393
40	021	024	027	2 DH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,19	13,84	16,20	22,77	867	1015	1427
41	345	348	351	2 DH	3 Erdgas	2 Mittel	0,18	0,33	12,80	15,31	22,33	752	899	1312
42	669	672	675	2 DH	3 Erdgas	3 Hoch	0,22	0,51	12,12	14,80	22,12	684	835	1248
43	039	042	045	3 RH	3 Erdgas	1 Gering	0,23	0,34	12,23	14,61	21,16	767	915	1326
44	363	366	369	3 RH	3 Erdgas	2 Mittel	0,26	0,49	11,92	14,47	21,49	701	850	1262
45	687	690	693	3 RH	3 Erdgas	3 Hoch	0,27	0,62	11,76	14,44	21,85	663	814	1232
46	075	078	081	4 PH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,39	15,13	17,66	25,18	740	864	1232
47	399	402	405	4 PH	3 Erdgas	2 Mittel	0,19	0,78	13,94	16,58	24,11	682	811	1180
48	723	726	729	4 PH	3 Erdgas	3 Hoch	0,26	1,30	13,43	16,09	23,61	657	787	1155
49	057	060	063	5 ZH	3 Erdgas	1 Gering	0,21	0,62	14,04	16,92	24,29	687	828	1188
50	381	384	387	5 ZH	3 Erdgas	2 Mittel	0,29	1,17	13,46	16,29	23,71	658	797	1160
51	705	708	711	5 ZH	3 Erdgas	3 Hoch	0,29	1,46	13,24	16,03	23,45	648	784	1147
52	093	096	099	6 B/W	3 Erdgas	1 Gering	0,35	1,41	13,16	15,84	23,27	644	775	1138
53	417	420	423	6 B/W	3 Erdgas	2 Mittel	0,35	1,77	13,01	15,68	23,12	636	767	1131
54	741	744	747	6 B/W	3 Erdgas	3 Hoch	0,35	2,12	12,76	15,48	22,91	624	757	1121

Abbildung 62:

Auswertung von 54 Varianten sortiert aufsteigend nach absoluter städtebaulicher Dichte (GFZ).



Opt.	Siedlungsvariante-Nr.:			Gebäudetyp	Versorgungssystem	Siedlungsdichtetyp	Städtebauliche Dichte		GWP pro m²			GWP pro Person		
	15 kWh	30 kWh	70 kWh				GRZ	GFZ	15 kWh	30 kWh	70 kWh	15 kWh	30 kWh	70 kWh
1	002	005	008	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,11	0,16	12,48	13,69	17,31	849	931	1177
2	001	004	007	1 EFH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,11	0,16	18,03	18,97	21,84	1226	1290	1485
3	003	006	009	1 EFH	3 Erdgas	1 Gering	0,11	0,16	14,86	17,16	23,63	1010	1167	1607
4	020	023	026	2 DH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,19	11,63	12,89	16,55	729	808	1037
5	019	022	025	2 DH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,19	16,78	17,76	20,68	1051	1113	1296
6	021	024	027	2 DH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,19	13,84	16,20	22,77	867	1015	1427
7	326	329	332	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,14	0,25	11,38	12,74	16,63	726	812	1060
8	325	328	331	1 EFH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,14	0,25	14,82	15,87	18,97	945	1012	1210
9	327	330	333	1 EFH	3 Erdgas	2 Mittel	0,14	0,25	13,83	16,35	23,35	882	1042	1489
10	344	347	350	2 DH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,18	0,33	10,49	11,83	15,75	616	695	925
11	343	346	349	2 DH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,18	0,33	13,73	14,78	17,90	807	868	1051
12	345	348	351	2 DH	3 Erdgas	2 Mittel	0,18	0,33	12,80	15,31	22,33	752	899	1312
13	038	041	044	3 RH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,23	0,34	10,10	11,39	15,03	633	714	942
14	037	040	043	3 RH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,23	0,34	15,07	16,07	18,97	944	1007	1189
15	039	042	045	3 RH	3 Erdgas	1 Gering	0,23	0,34	12,23	14,61	21,16	767	915	1326
16	650	653	656	1 EFH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,16	0,36	10,25	11,71	15,81	628	717	967
17	649	652	655	1 EFH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,16	0,36	13,13	14,27	17,53	803	873	1073
18	651	654	657	1 EFH	3 Erdgas	3 Hoch	0,16	0,36	12,75	15,41	22,76	780	943	1393
19	074	077	080	4 PH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,13	0,39	12,81	14,12	18,22	627	691	892
20	073	076	079	4 PH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,13	0,39	15,74	16,73	19,98	770	818	978
21	075	078	081	4 PH	3 Erdgas	1 Gering	0,13	0,39	15,13	17,66	25,18	740	864	1232
22	362	365	368	3 RH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,26	0,49	9,69	11,06	14,97	569	650	880
23	361	364	367	3 RH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,26	0,49	12,83	13,91	17,02	754	817	1000
24	363	366	369	3 RH	3 Erdgas	2 Mittel	0,26	0,49	11,92	14,47	21,49	701	850	1262
25	668	671	674	2 DH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,22	0,51	9,75	11,22	15,29	550	633	862
26	667	670	673	2 DH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,22	0,51	12,78	13,93	17,16	721	785	968
27	669	672	675	2 DH	3 Erdgas	3 Hoch	0,22	0,51	12,12	14,80	22,12	684	835	1248
28	686	689	692	3 RH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,27	0,62	9,44	10,90	15,00	532	615	846
29	685	688	691	3 RH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,27	0,62	12,50	13,65	16,89	705	770	953
30	687	690	693	3 RH	3 Erdgas	3 Hoch	0,27	0,62	11,76	14,44	21,85	663	814	1232
31	056	059	062	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,21	0,62	11,75	13,21	17,32	575	646	847
32	055	058	061	5 ZH	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,21	0,62	15,38	16,53	19,80	753	808	969
33	057	060	063	5 ZH	3 Erdgas	1 Gering	0,21	0,62	14,04	16,92	24,29	687	828	1188
34	398	401	404	4 PH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,19	0,78	11,63	13,02	17,18	569	637	841
35	397	400	403	4 PH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,19	0,78	13,81	14,88	18,20	675	728	890
36	399	402	405	4 PH	3 Erdgas	2 Mittel	0,19	0,78	13,94	16,58	24,11	682	811	1180
37	380	383	386	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,29	1,17	11,16	12,62	16,78	546	617	821
38	379	382	385	5 ZH	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,29	1,17	13,93	15,07	18,40	681	737	900
39	381	384	387	5 ZH	3 Erdgas	2 Mittel	0,29	1,17	13,46	16,29	23,71	658	797	1160
40	722	725	728	4 PH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,26	1,30	11,13	12,54	16,71	544	613	818
41	721	724	727	4 PH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,26	1,30	12,82	13,92	17,25	627	681	844
42	723	726	729	4 PH	3 Erdgas	3 Hoch	0,26	1,30	13,43	16,09	23,61	657	787	1155
43	092	095	098	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	1 Gering	0,35	1,41	10,72	12,18	16,34	525	596	799
44	091	094	097	6 B/W	2 Nahwärme kalt	1 Gering	0,35	1,41	13,47	14,60	17,93	659	715	877
45	093	096	099	6 B/W	3 Erdgas	1 Gering	0,35	1,41	13,16	15,84	23,27	644	775	1138
46	704	707	710	5 ZH	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,29	1,46	10,94	12,40	16,56	535	607	810
47	703	706	709	5 ZH	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,29	1,46	13,15	14,29	17,61	643	699	861
48	705	708	711	5 ZH	3 Erdgas	3 Hoch	0,29	1,46	13,24	16,03	23,45	648	784	1147
49	416	419	422	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	2 Mittel	0,35	1,77	10,60	12,05	16,22	519	590	794
50	415	418	421	6 B/W	2 Nahwärme kalt	2 Mittel	0,35	1,77	12,79	13,92	17,25	626	681	844
51	417	420	423	6 B/W	3 Erdgas	2 Mittel	0,35	1,77	13,01	15,68	23,12	636	767	1131
52	740	743	746	6 B/W	1 LW Wärmepumpe	3 Hoch	0,35	2,12	10,37	11,87	16,02	508	581	784
53	739	742	745	6 B/W	2 Nahwärme kalt	3 Hoch	0,35	2,12	12,16	13,34	16,65	595	653	815
54	741	744	747	6 B/W	3 Erdgas	3 Hoch	0,35	2,12	12,76	15,48	22,91	624	757	1121

7.1.3 Der Einfluss des Haushaltsstroms

Der Haushaltsstrom wird in Gebäudeökobilanzen üblicherweise nicht bilanziert, weil dieser außerhalb der betrachteten Systemgrenzen liegt. In der Nutzungsphase B6 wird nur der Energiebedarf aus der Wärmeversorgung inklusive der dafür erforderlichen Betriebsenergie (Pumpenstrom etc.) betrachtet. Wenn der Haushaltsstrom aber in die Bilanzgrenze einbezogen wird, zeigt sich, dass das von ihm verursachte GWP einen sehr großen Einfluss auf die Gesamtökobilanz hat.

In Kapitel 6.5 wurde gezeigt, dass die durchschnittliche Menge des verbrauchten Haushaltsstroms mit zunehmender Haushaltsgröße von ca. 1.900 kWh/Person * a bei Ein-Personen-Haushalten auf ca. 1.020 kWh/Person * a bei Vier-Personen-Haushalten (und größer) abnimmt (BDEW 2021) (Abbildung 44, Seite 89). Für eine exakte Berechnung des Haushaltsstrombedarfs müssten im Rechenmodell daher Anzahl und Verteilung der Haushaltsgrößen der jeweiligen Siedlungstypen ermittelt und diese mit der spezifischen Personenanzahl in den Haushalten sowie den genannten Verbrauchskennwerten multipliziert werden. Daraus resultiert die Summe des Strombedarfs der in dem bilanzierten Siedlungstyp lebenden Personen. Für die Modellrechnung wurde eine vereinfachte Annahme mit einem gemittelten Einheitswert von 1.551 kWh/Person*a angenommen, der sich aus der statistischen Verteilung an Haushaltsgrößen errechnet (siehe Tabelle 8, Seite 89). Dieser ist dann mit den CO₂-Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde Strom zu multiplizieren, um das daraus resultierende Siedlungs-GWP zu ermitteln. Mit einem Anteil von derzeit (Bilanzjahr 2022) etwa 50 % erneuerbaren Energien in der Stromproduktion beträgt dieser Wert im deutschen Strommix ca. 430 g CO₂eq/kWh (Umweltbundesamt, 2024b) (Abbildung 45, Seite 90).

Bei einem gemittelten Strombedarf von 1.551 kWh/Person*a und einem GWP von ca. 0,430 kg CO₂ eq/kWh für den eingesetzten Strom ergibt sich ein GWP für den Haushaltsstrom von ca. 667 kg CO₂ eq/Person*a, das den Berechnungen aller Siedlungsvarianten zugrunde gelegt wurde. Unter der Voraussetzung, dass der aktuelle Strommix in Deutschland über den Lebenszyklus von 50 Jahren unverändert bliebe (statische LCA), trägt der Haushaltsstrom über alle untersuchten Siedlungsvarianten hinweg mit einer Größenordnung von 10 bis knapp 14 kg CO₂ eq/m²*a zu einem erheblichen Anteil am GWP der Siedlungen bei. Das zeigt sich sowohl im Vergleich der Bilanz aller Siedlungsvarianten (Abbildung 63). Über alle Siedlungsvarianten hinweg beträgt der Anteil des Haushaltsstroms zwischen 30-57% am Gesamt-GWP der jeweiligen Siedlung.

Der jeweilige Anteil des Haushaltsstroms an den Bebauungstypen beträgt differenziert nach Flächenindikator (Abbildungen 64 und 66) und nach Personenindikator (Abbildungen 65 und 67) im Mittelwert zwischen 39 und 48%. Das Verhältnis des Haushaltsstroms zu den anderen Kostengruppen ist in Abbildung 68 dargestellt.

Abbildung 63:

GWP-Gesamt für den Haushaltsstrom in allen 972 Siedlungsvarianten, GWP in [kg CO₂ eq/m² NRF * a]

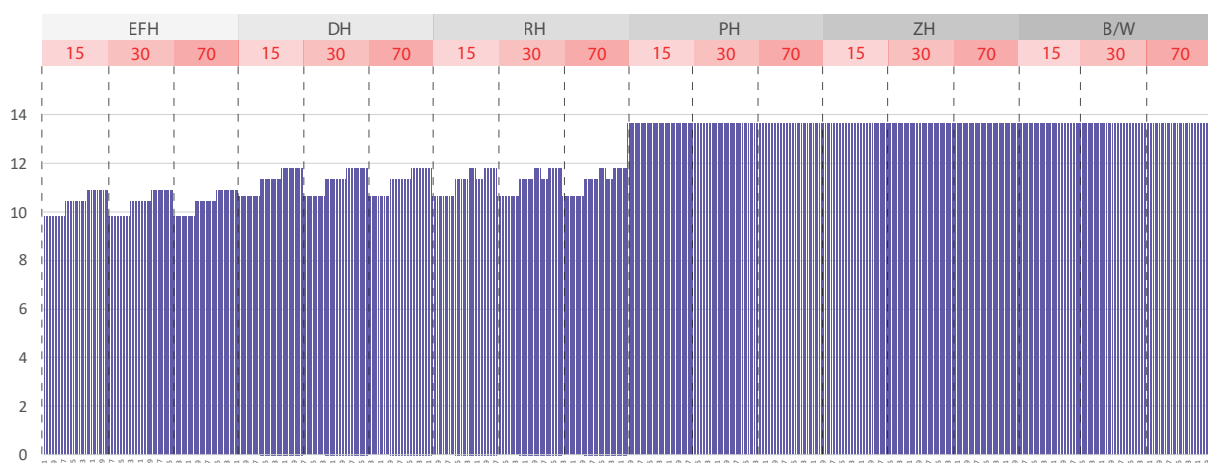
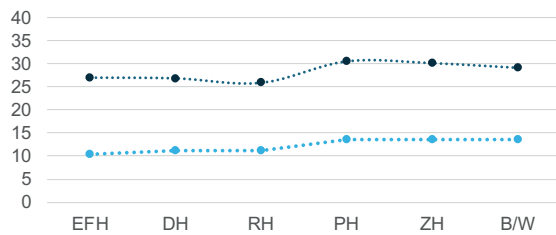
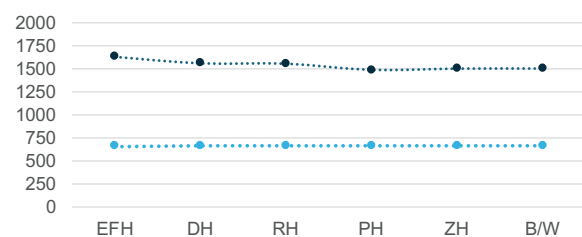


Abbildung 64:

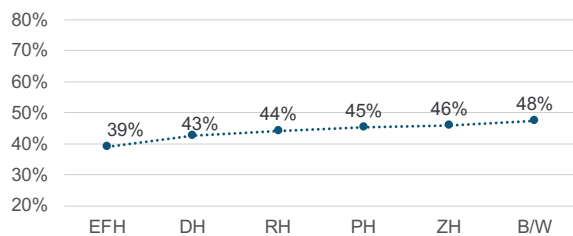
Gesamt-GWP der Siedlungstypen mit Haushaltsstrom differenziert nach Bebauungstypen, Mittelwerte in $[\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{m}^2 \text{NRF} \cdot \text{a}]$

**Abbildung 65:**

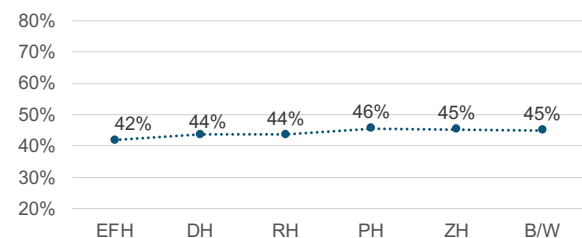
Gesamt-GWP der Siedlungstypen mit Haushaltsstrom differenziert nach Bebauungstypen, Mittelwerte in $[\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{Person} \cdot \text{a}]$

**Abbildung 66:**

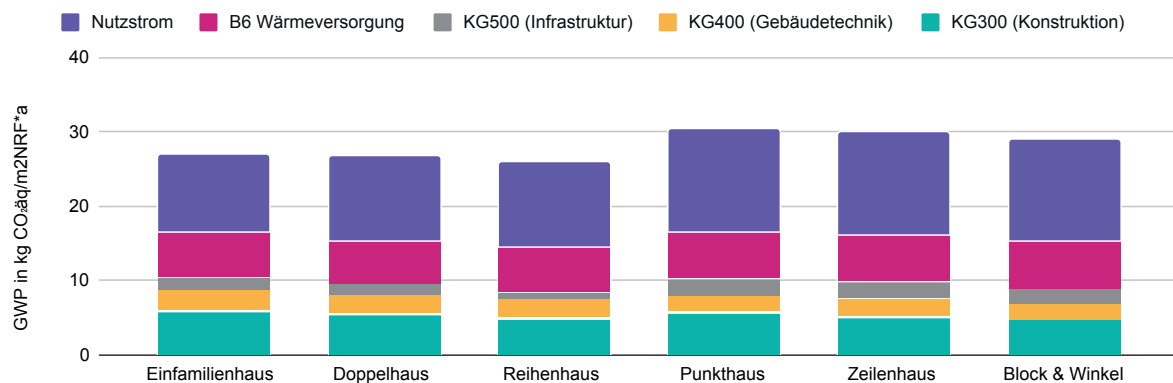
Anteil des Haushaltsstroms am Gesamt-GWP $[\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{m}^2 \text{NRF} \cdot \text{a}]$ der jeweiligen Bebauungstypen, Mittelwerte in Prozent

**Abbildung 67:**

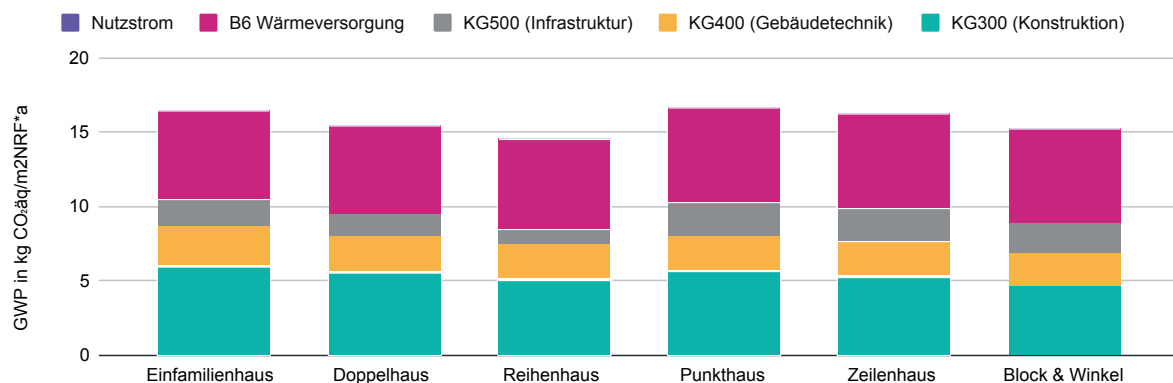
Anteil des Haushaltsstroms am Gesamt-GWP $[\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{Person} \cdot \text{a}]$ in Prozent der jeweiligen Bebauungstypen, Mittelwerte in Prozent

**Abbildung 68:**

Anteil der Kostengruppen am GWP der sechs Gebäudetypen (inkl. Haushaltsstrom), GWP in $\text{kg CO}_2\text{eq}/[\text{m}^2 \text{NRF} \cdot \text{a}]$

**Abbildung 69:**

Anteil des GWP an den Kostengruppen für die sechs Gebäudetypen (ohne Haushaltsstrom), GWP in $\text{kg CO}_2\text{eq}/[\text{m}^2 \text{NRF} \cdot \text{a}]$



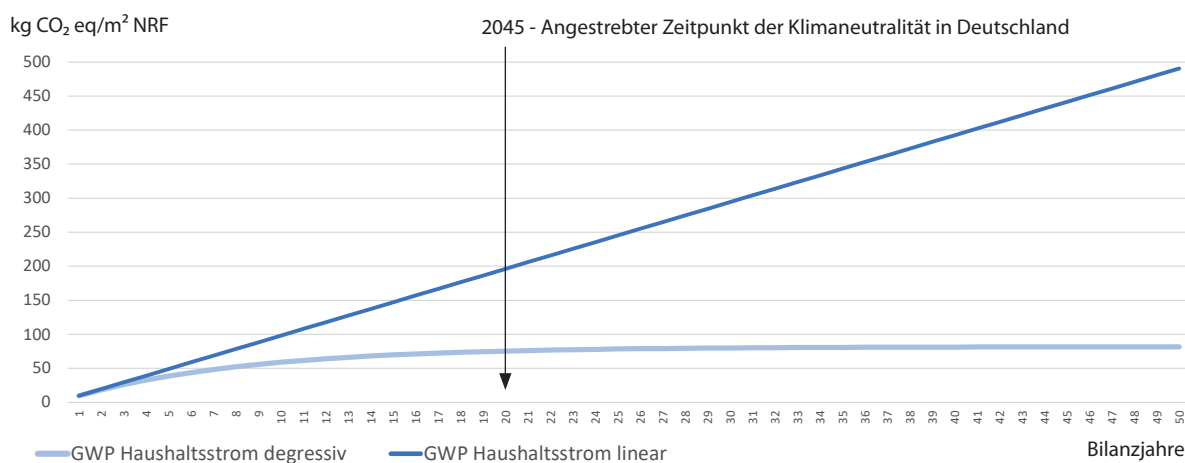
Im Verhältnis zu allen anderen Kostengruppen hat der Haushaltsstrom damit einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtökobilanz und eine vollständige Dekarbonisierung dieses Sektors wird eine große Wirkung auf die siedlungsbedingten Klimagasemissionen entfalten.

Seit dem Jahr 2022 ist das GWP im deutschen Strommix von 429 Gramm auf 380 Gramm CO₂ pro kWh Strom im Jahr 2024 gesunken (Umweltbundesamt, 2024b). Im Hinblick auf die deutschen Klimaschutzziele mit einer politisch verankerten Dekarbonisierung der Energieversorgung des deutschen Stromsystems bis zum Jahr 2045 sollen diese Emissionen perspektivisch auf Null gesenkt werden, was die Anteile aus dem Haushaltsstrom schon in den nächsten Jahren mehr oder weniger kontinuierlich sinken lässt. Unter der Annahme einer durchschnittlichen jährlichen Degressionsrate von ca. 12 % könnte die Stromversorgung ab 2045 vollständig dekarbonisiert sein und verändert damit erheblich die durchschnittliche Entwicklung des GWP an der Siedlungsbilanz. Daher ist eine Degression des GWP aus dem Haushaltsstrom in der Bilanzierung über 50 Jahre zu berücksichtigen, da sonst bei einem gleichbleibenden GWP die Gesamtsumme zu hoch ausfallen würde. Eine Annahme von gleichbleibenden GWP-Emissionen des aktuellen Status quo über die nächsten 50 Jahre ist daher nicht zweckmäßig.

Da das GWP des Haushaltsstroms aufgrund der angestrebten Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems zukünftig stark sinkt (Abbildung 70) und auch durch planerische Entscheidungen auf der Siedlungsebene nur sehr geringfügig beeinflusst werden kann, wird dieser Parameter in der weiteren Ergebnisauswertung nicht weiter berücksichtigt.

Abbildung 70:

Summenbilanz jährliches GWP des Haushaltsstroms über 50 Jahre (Bilanzgrenze der Ökobilanz) bei statischer und dynamischer Betrachtung des deutschen Stromsystems in [kg CO₂ eq/m² NRF*a].



In einer Quartiersökobilanz ist nicht nur die Entwicklung des deutschen Energiesystems, sondern die gesamte Lebenszyklusanalyse mit einer dynamischen Betrachtung (dynamische LCA) durchzuführen, um die Veränderung in der Energieversorgung im Hinblick auf den jährlichen Wärmebedarfsdeckung und in den technischen Produktionsweisen der Baumaterialien - beispielsweise durch Einsatz von Recycling-Baustoffen - angemessen abzubilden. Das hat auch Auswirkungen auf die Ergebnisse der Sanierungszyklen. Eine weiterführende Erörterung dieses Themas erfolgt in Kapitel 7.3.

7.1.4 Konstruktionsweisen (KG 300)

Die Auswertung nach der Kostengruppe 300 zeigt, dass über alle 972 Varianten hinweg das GWP der Holzbauweise gegenüber mineralischen Ausführungen bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen um etwa 0,5 bis 2 kg CO₂ eq/m² NRF* a niedriger ausfällt (Abbildung 71). Der flächenbezogene GWP-Kennwert sinkt mit zunehmender Gebäudegröße und baulicher Dichte für die Baukonstruktion sowohl beim Holzbau als auch bei mineralischen Bauweisen. Das resultiert unter anderem aus den Modellannahmen, da eine Zunahme der Dichte im Wesentlichen durch eine höhere Geschossigkeit der Gebäude erzeugt wird. Mit zunehmendem Gebäudevolumen reduziert sich das A/V-Verhältnis und damit der Hüllflächenanteil im Verhältnis zur genutzten Fläche. Bei den hohen Gebäuden wird dieser Vorteil durch die angenommenen Tiefgaragenstellplätze jedoch ein Stück weit konterkariert. Aufgrund einer größeren Einwohnerzahl und -dichte bei den höheren Gebäudetypen steigt die Anzahl der Wohnungen und damit auch der Stellplatzbedarf, wenn das Parken aus städtebaulichen Gründen nicht auf Außenflächen, sondern unterirdisch realisiert wird. Das bildet sich in den Ergebnissen für die Kostengruppe 500 Erschließung mit Aushub ab. Beim Gebäudetyp Block/Winkel sind das etwa 1,5 kg CO₂ eq/m² NRF* a, beim Punkthaus sogar bis zu 2,5 kg (Abbildung 72). Eine Absenkung des Stellplatzschlüssels hätte eine signifikant reduzierende Auswirkung auf das GWP der großen Gebäudetypen.

Abbildung 71:

Auswertung KG 300 Baukonstruktion mit Aushub für alle 972 Siedlungsvarianten. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

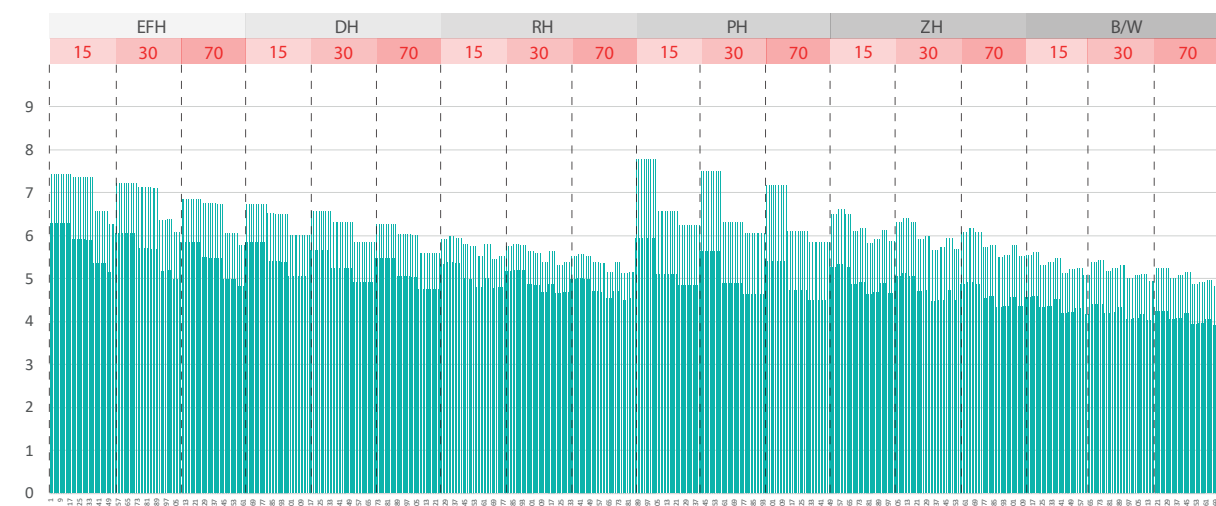
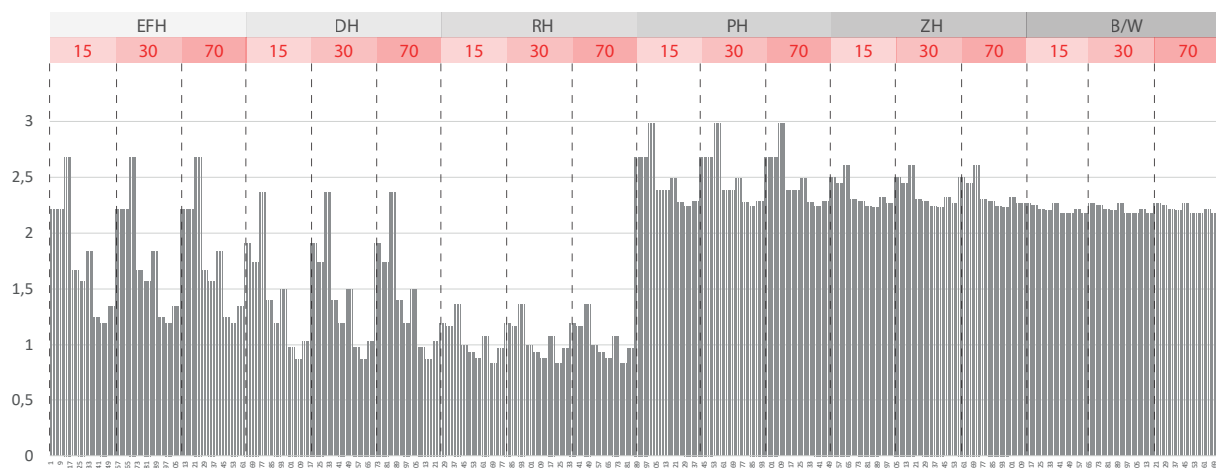


Abbildung 72:

Auswertung KG 500 Erschließung mit Aushub für alle 972 Siedlungsvarianten. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]



Im Durchschnitt führt die mineralische Ausführung zu einem 8,1 % höheren GWP als bei einer Holzbausiedlung (Abbildung 73). Im Vergleich der Gebäudetypen zeigt sich, dass dieser Einflussfaktor bei allen Gebäudetypen ungefähr ähnlich stark auftritt. Einzig das Einfamilien- und Punkthaus zeigt eine etwas größere Differenz zwischen den zwei Bauweisen (Reduktion um 11,1 %).

Bei spezifischer Betrachtung der Kostengruppe 300 zeigt sich der Einfluss des Faktors Bauweise noch deutlicher (Abbildung 74). Man sieht, dass Siedlungen in Massivbauweise im Durchschnitt einen 18,2 % höheren GWP haben als Siedlungen in Holzbauweise. Besonders gering ist der Einfluss beim Reihenhaus (Reduktion um 12,1 %) und besonders groß beim Punkthaus (Reduktion um 23,4 %) und Einfamilienhaus.

Abbildung 73:

Vergleich des flächenbezogenen GWPs der Gebäudetypen in Holz- und Massivbauweise (Betrachtung aller Kostengruppen, ohne Haushaltsstrom).

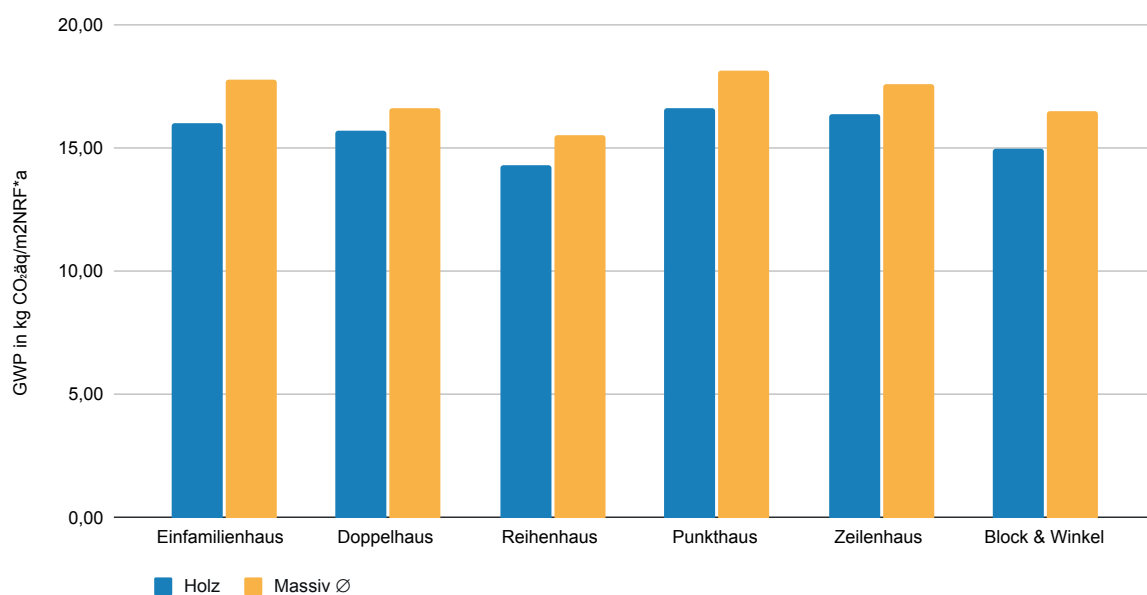
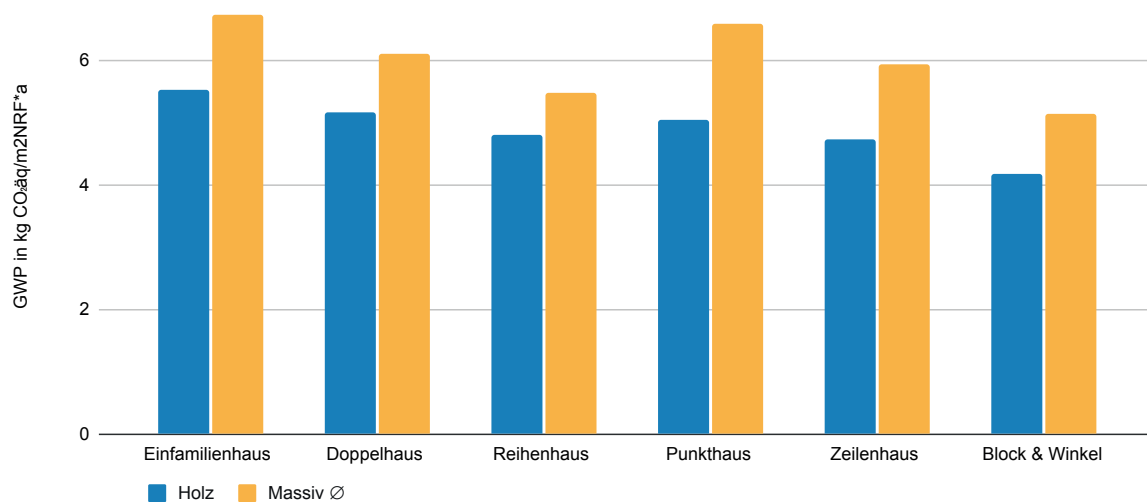


Abbildung 74:

Vergleich des flächenbezogenen GWP der Gebäudetypen in Holz- und Massivbauweise (nur KG 300, ohne Haushaltsstrom).

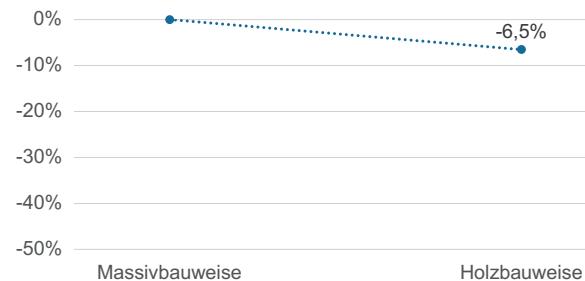


Der Einfluss der Bauweise (Holz oder mineralisch) ist über alle Gebäudetypen insgesamt relativ konstant. Größte Abhängigkeiten:

- Im Mittel liegt das Einsparpotenzial einer Holz- gegenüber einer mineralischen Bauweise bei den Modellrechnungen bei ca. 6,5 % (Abbildung 75). Der Einsatz von effizienten Holzbauweisen oder Recycling-Baustoffen wurde hier nicht betrachtet.
- Einfluss des Gebäudetyps auf die Bauweise:
Am stärksten ist die Auswirkung der Effizienzvorteile des Holzbaus bei der Punkthausbebauung (8,7 % gegenüber mineralischer Bauweise). Beim Reihenhaus liegen die Vorteile nur bei 4,4 % (geringster Wert im Vergleich).

Abbildung 75:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] einer Holzbausiedlung im Vergleich zu einer Siedlung in mineralischer Bauweise (in Prozent)



Auswertung, Fassaden und Decken, Aushub

Eine Mittelwertdarstellung der KG 300 für die einzelnen Bauteilgruppen zeigt näher, welcher GWP-Anteil mit den jeweiligen Bauteilen verbunden ist. Die Decken nehmen mit 16,7 % den größten Anteil ein, gefolgt von den Außenwänden, der Bodenplatte und dem Dach (Abbildung 76). Die nachfolgenden Abbildungen 77 bis 82 zeigen exemplarisch im Vergleich die Unterschiede zwischen mineralischer und Holzbauweise, der sich auch in Abbildung 69 durch die Schattierung abbildet. Das GWP für die Bauteile in Holzbauweise ist Abbildung 77 für KG 300 - komplett, in Abbildung 78 für KG 331 und 334 - Außenwand und Fenster sowie in Abbildung 79 für KG 341 - Geschoßdecke dargestellt, das GWP für die gleichen Bauteile in mineralischer Bauweise analog in den Abbildungen 80, 81 und 82.

Abbildung 76:

Relativer Anteil der Bauteile am GWP/m² NRF der Kostengruppe 300 im Mittel aller Siedlungsvarianten.

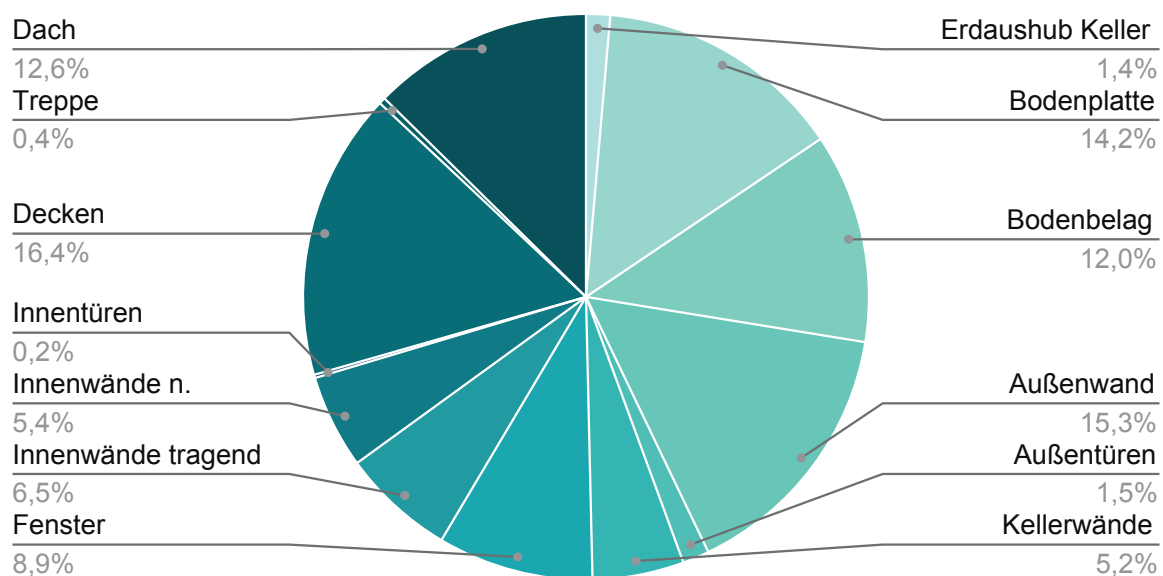


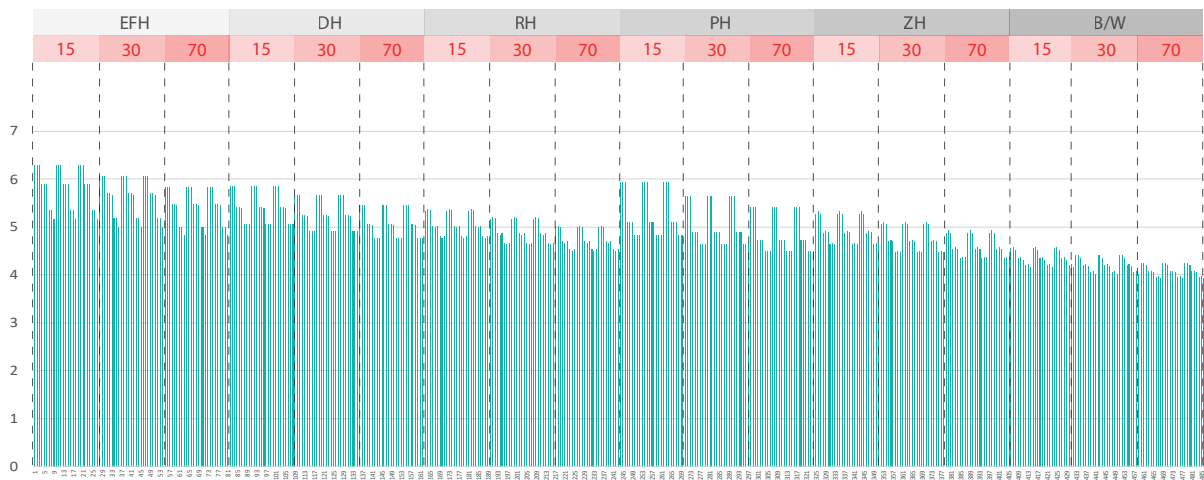
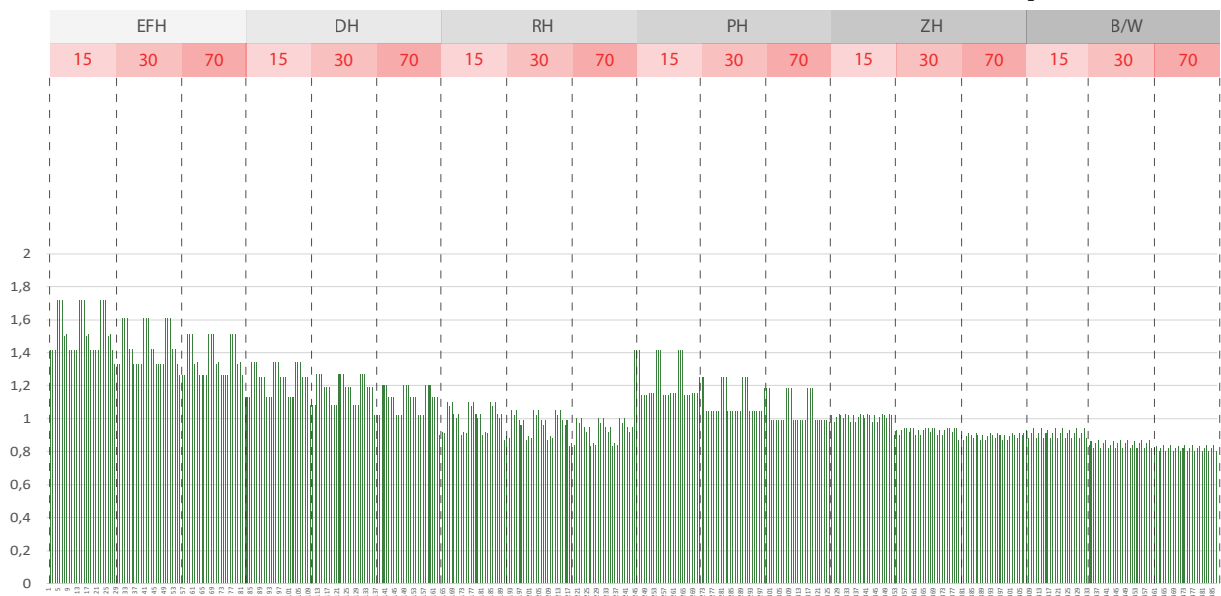
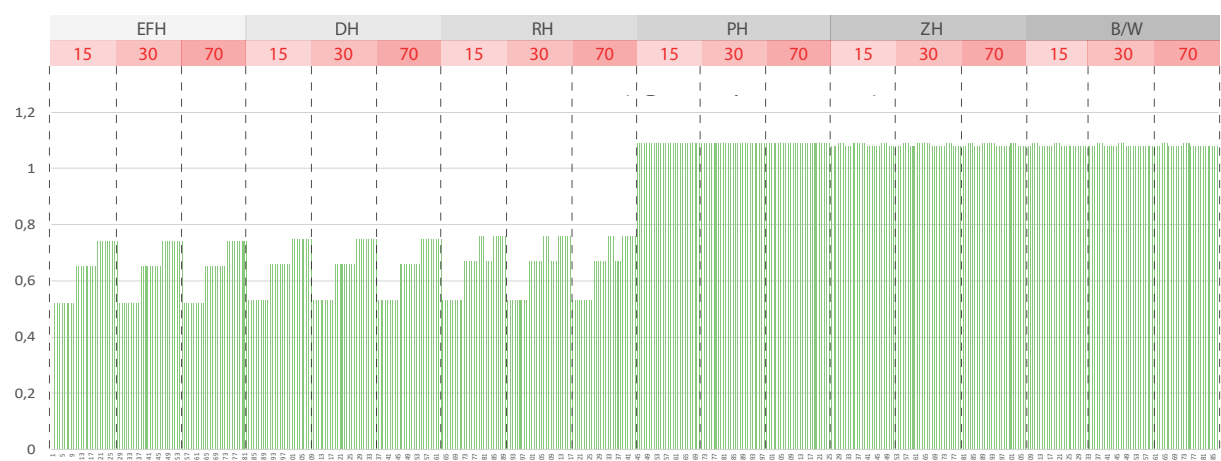
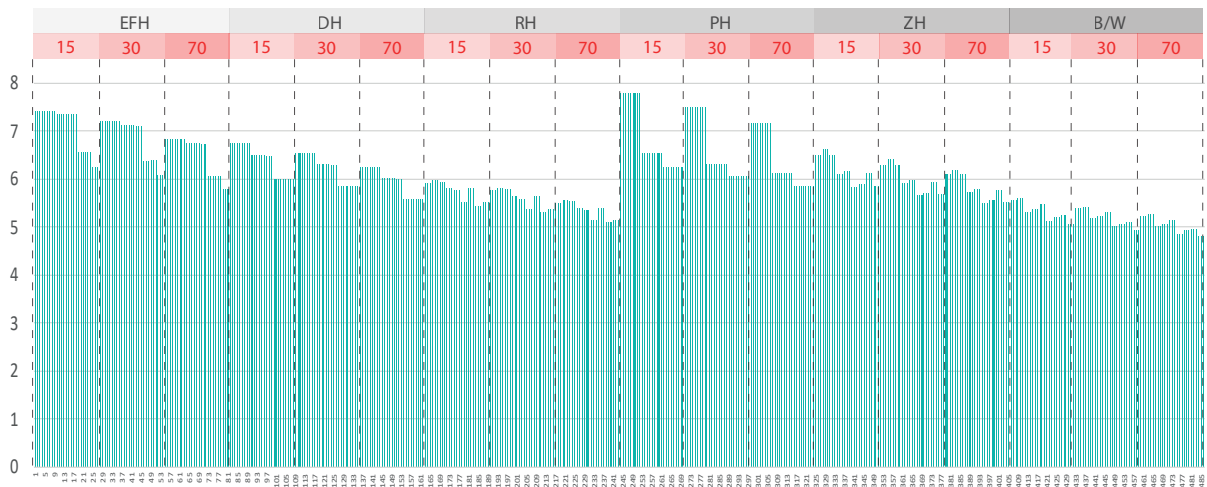
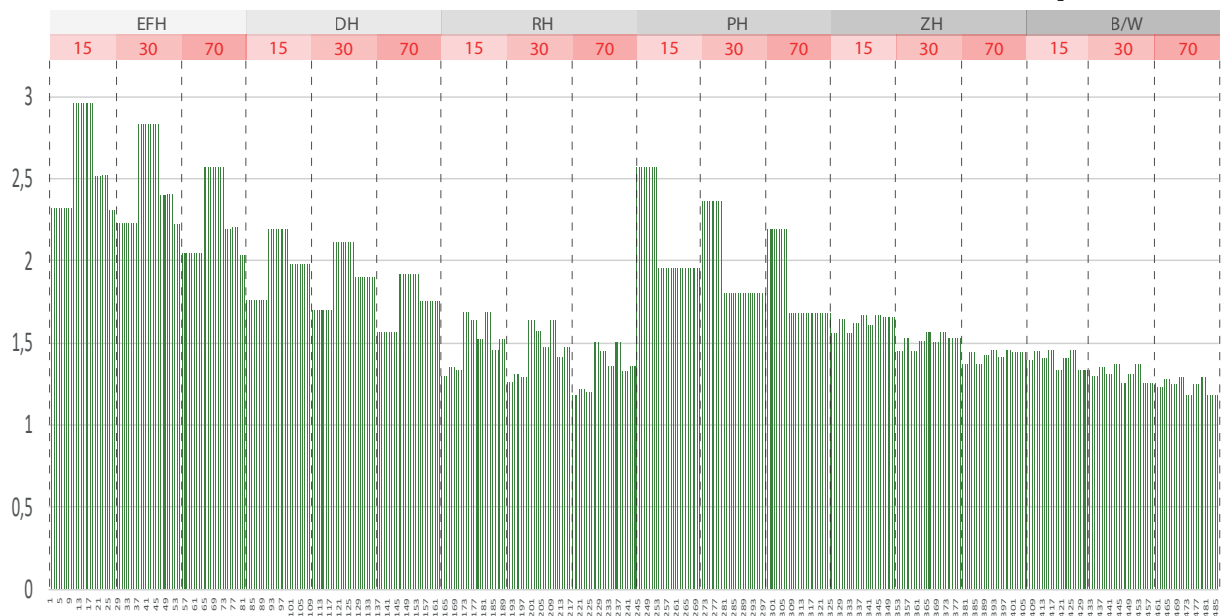
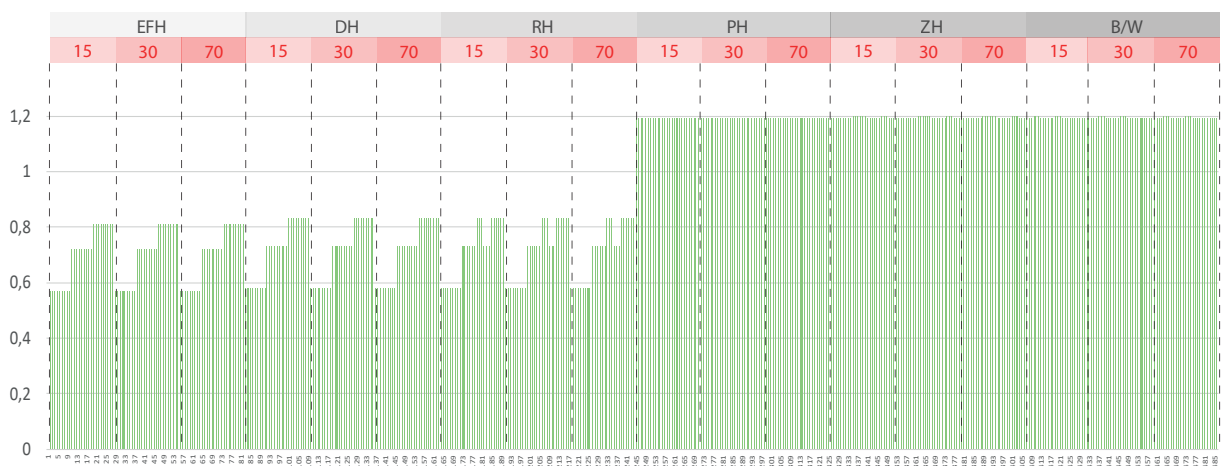
Abbildung 77:Auswertung KG 300 (komplett) für alle 486 Siedlungsvarianten in Holzbauweise. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]**Abbildung 78:**Auswertung KG 331 und 334 - Fassade für alle 486 Siedlungsvarianten in Holzbauweise. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]**Abbildung 79:**Auswertung KG 341 - Geschoßdecke für alle 486 Siedlungsvarianten in Holzbauweise. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

Abbildung 80:Auswertung KG 300 (komplett) für alle 486 Siedlungsvarianten in mineralischer Bauweise. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]**Abbildung 81:**Auswertung KG 331 und 334 - Fassade für alle 486 Siedlungsvarianten in mineralischer Bauweise. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]**Abbildung 82:**Auswertung KG 341 - Geschoßdecke für alle 486 Siedlungsvarianten in mineralischer Bauweise. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

Das GWP für die gesamte Konstruktion in der Kostengruppe 300 bewegt sich zwischen ca. 4 bis 6 kg CO₂ eq/ m² NRF * a für die Holzbauweisen und zwischen ca. 5 bis 8 kg für die mineralischen Bauweisen. Exemplarisch sind hier mit Außenwand/Fenster und Geschossdecken zwei Bauteilgruppen herausgegriffen, um auch auf der Bauteilebene die Unterschiede zwischen den beiden Bauweisen im Hinblick auf den Einfluss der anderen Parameter wie Gebäudetyp und städtebauliche Dichte zu analysieren. Große Unterschiede zeigen sich vor allem bei der Kostengruppe 331 (Außenwand).

Die mineralische Bauweise, die hier als Ausführung in Kalksandstein mit Mineralwolle modelliert wurde, ist mit 1,0 bis 1,5 kg CO₂ eq/ m² NRF * a erheblich GWP-intensiver als die Holzbauweise und entspricht in dieser Größenordnung ungefähr der mittleren GWP-Intensität der städtischen Infrastruktur (Kostengruppe 500) für die niedrigen Gebäudetypen (vergl. Abbildung 94 in Kapitel 7.1.6). Diese Differenz findet sich konstant bei ansonsten vergleichbaren Randbedingungen. Signifikant ist, dass über Gebäudetypen hinweg das GWP mit jeweils steigender Siedlungsdichte sinkt - ein Effekt, der relational auch von kleineren (EFH, DH, RH) zu den größeren Gebäudetypen (PH, ZH, BW) zu beobachten ist. Das lässt sich durch das geometrisch begründete günstigere Volumenverhältnis erklären, weil Wohnfläche mit einem geringeren Konstruktionsanteil bereitgestellt werden kann - ein Effekt, der sich gleichermaßen auf den Wärmebedarf von Gebäuden auswirkt.

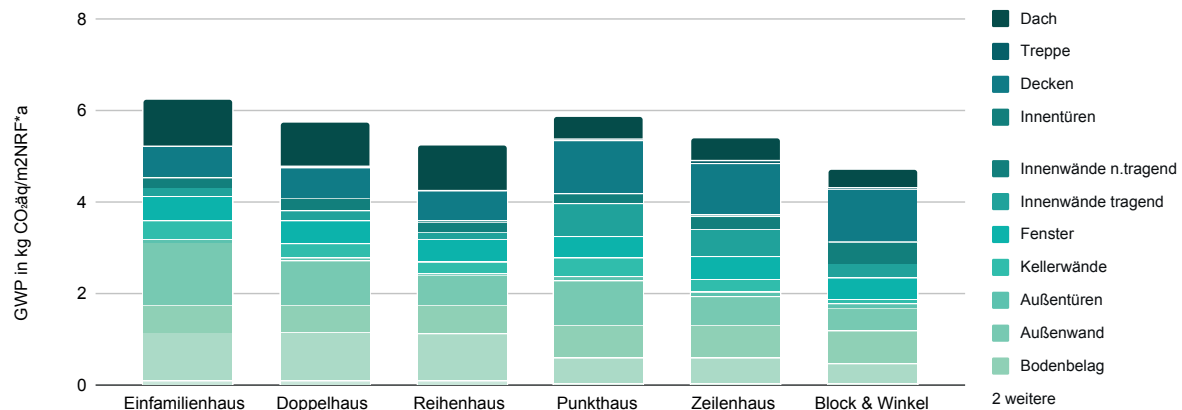
Bei den Geschossdecken hingegen zeigen sich keine so große Differenzen, was in den getroffenen konstruktiven Annahmen begründet ist. Hier gibt es effizientere (Holz-)Bauweisen, die weniger Material und damit ein geringeres GWP ermöglichen. Da der Baumassen- und Volumenanteil der Geschossdecke bei dichteren Bauweisen ansteigt, zeigt sich hier auch kein Minderungseffekt. Insbesondere bei den kleinen Gebäudetypen wird das sichtbar, die Unterschiede im Bereich von 0,1 bis 0,2 kg CO₂ eq/ m² NRF * a sind aber marginal.

Unter Betrachtung der sechs Gebäudetypen wird dagegen deutlich, dass verschiedene Bauteile bei kleineren Gebäudetypen einen größeren bzw. kleineren Anteil am GWP einnehmen, als im Vergleich zu den übrigen Gebäudetypen (Abbildung 83). Mit zunehmender Größe (Geschossigkeit, Baumasse) des Gebäudetypen, wird zum Beispiel der Anteil Decken und Treppen sowie Fenster größer, während der Anteil des Daches und der Bodenplatte sich weniger stark auf den GWP auswirkt (Abbildung 84).

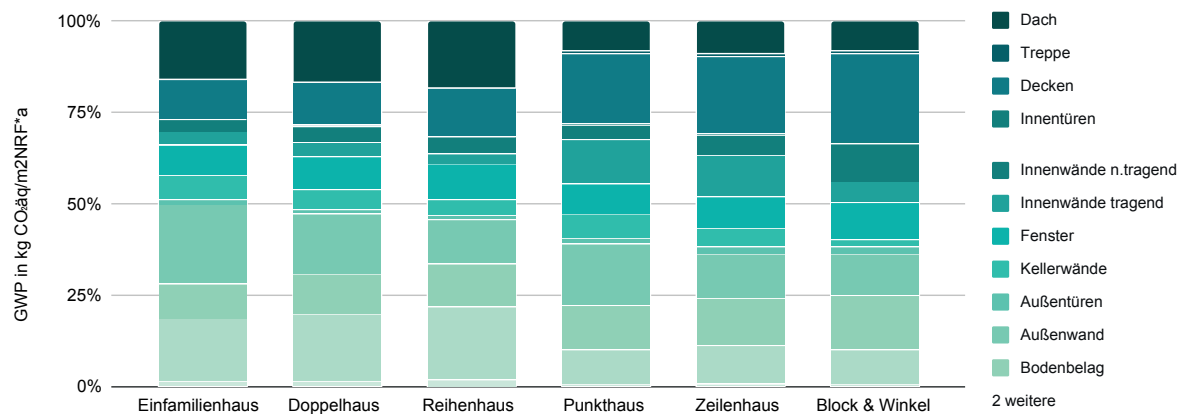
Die Keller verursachen inklusive des Erdaushubs einen relativ hohen Anteil an GWP, bei den kleinen Gebäudetypen fällt das stärker ins Gewicht als bei den großen Gebäudetypen. Das ist durch die Annahme in der Modellierung begründet, dass in großen Gebäude pro Wohneinheit 15 m² Kellerfläche angesetzt wurden, während bei den kleinen Gebäuden immer die Hälfte der Grundfläche als Kellerfläche angenommen wurde - nicht als Teilunterkellerung, sondern als Durchschnittswert, da einige Gebäude in der Praxis über keinen oder nur einen geringfügigen Kelleranteil verfügen.

Abbildung 83:

Absoluter Anteil der Bauteile der Kostengruppe 300 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

**Abbildung 84:**

Relative Anteile der Bauteile der Kostengruppe 300 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in Prozent

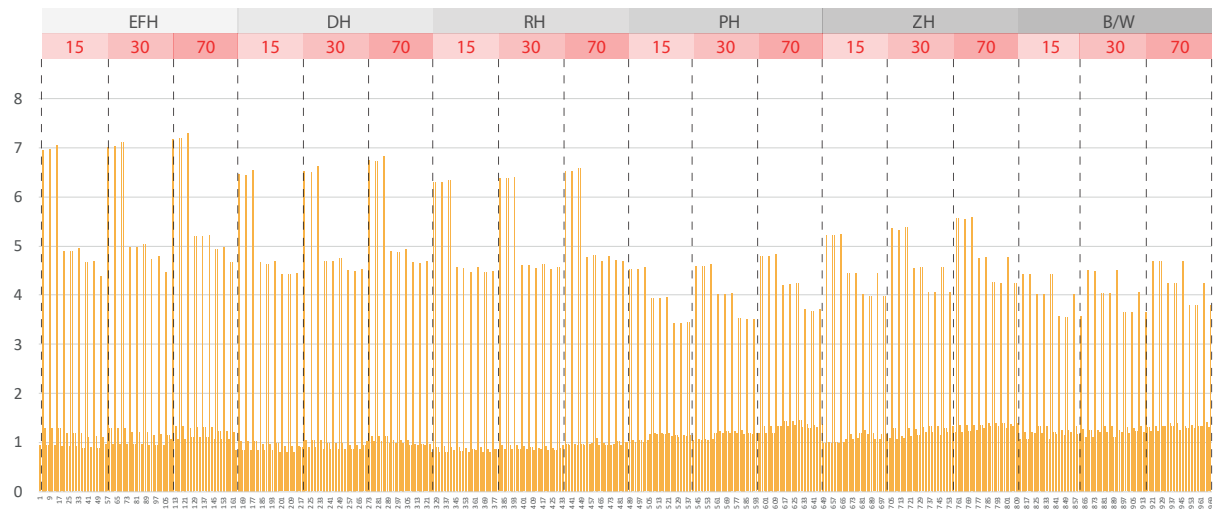
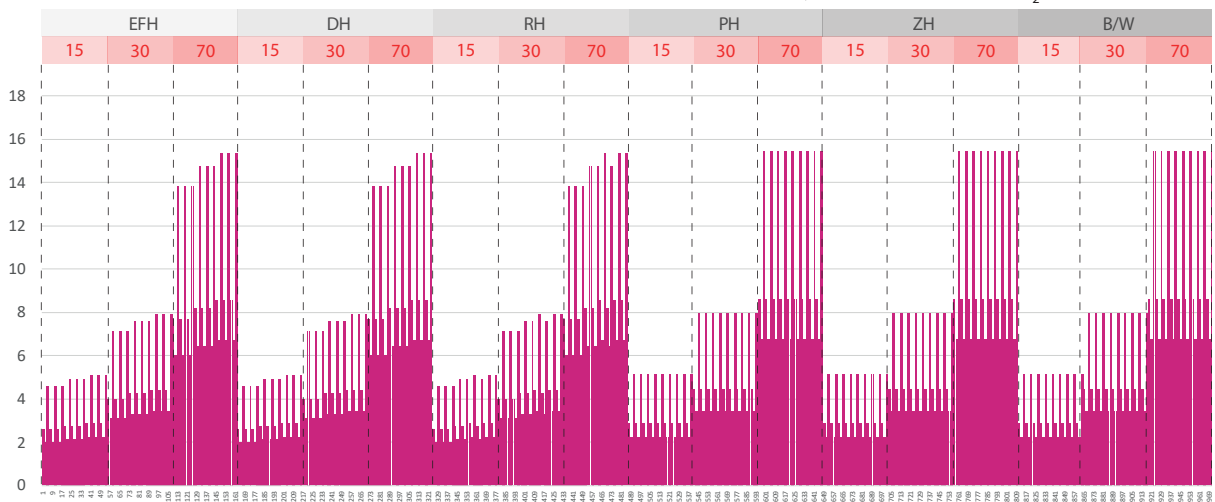
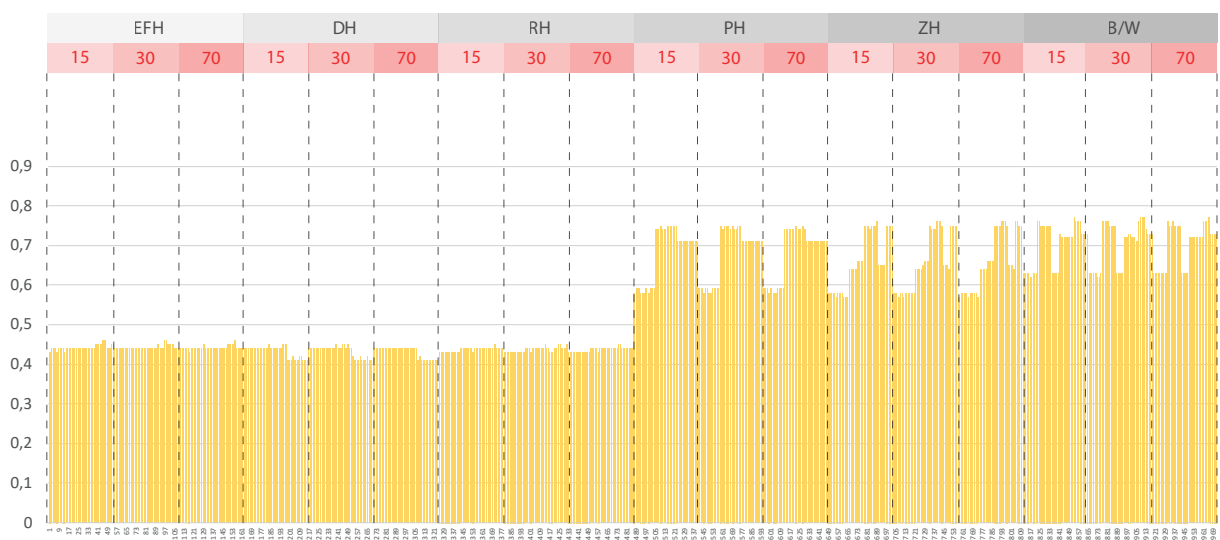


7.1.5 Gebäudetechnik, Wärmeversorgungssysteme und Energiekennwerte (KG 400, KG 420 und B6)

Den Einfluss der Wahl des Wärmeversorgungssystems auf das Siedlungs-GWP zeigt

Das GWP der Kostengruppe 400 wird stark vom Wärmeversorgungssystem (KG 420) dominiert, das wiederum einen sehr starken Einfluss auf das Siedlungs-GWP hat. Die Erdgasvarianten haben ein niedriges GWP in der Anlagentechnik, aber deutlich höhere Betriebsemissionen (Abbildungen 85 und 86). Dem gegenüber hat die kalte Fernwärme mit einem GWP von knapp 4 bis 7 kg CO₂ eq/m² NRF *a im Vergleich zur Luftwärmepumpe oder dem Gaskessel die mit Abstand höchsten Werte von den untersuchten Wärmeversorgungsvarianten. Dieses wird jedoch teilweise durch sehr niedrige Betriebswerte (B6) kompensiert, insbesondere bei Siedlungen mit einem höheren Energiebedarfswert (Abbildung 86). Die niedrigsten Werte mit ca. 0,4 bis 0,5 kg CO₂ eq/m² NRF *a wird bei allen Varianten durch eine Luftwärmepumpe erreicht.

Im Vergleich zum Wärmeversorgungssystem haben gebäudetechnische Anlagen wie Sanitär- und Elektroinstallationen aufgrund ihrer relativ geringen Massenströme nur einen geringen Einfluss auf das Siedlungs-GWP (Abbildung 87).

Abbildung 85:Auswertung der KG 400 Haustechnik inklusive KG 420 Wärmeversorgungssysteme). GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]**Abbildung 86:**Auswertung B6 - Energiebedarf für Wärmeversorgung (ohne gebäudetechnische Systeme). GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]**Abbildung 87:**Auswertung der KG 400 Haustechnik ohne KG 420 Wärmeversorgungssysteme. GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

Betriebsenergie (B6)

Das Siedlungs-GWP wird maßgeblich durch den Energiekennwert bestimmt (Abbildung 86). Im Mittelwert liegt das GWP in einer Siedlung mit einem Heizwärme-kennwert von 15 kWh/m² *a bei knapp 14 kg CO₂ eq/m² NRF *a, in einer 30 kWh-Siedlung bei 16 kg und in einer 70 kWh-Siedlung bei 21 kg. Eine 15 kWh-Siedlung hat damit ein fast 35 % und eine 30 kWh-Siedlung ein 24,5 % geringeres GWP als eine 70 kWh-Siedlung (flächenbezogener Indikator, Abbildung 88). Beim personenbezogenen Indikator liegen die Minderungswerte mit 33 % (15 kWh-Siedlung) bzw. 24 % (30 kWh-Siedlung) gegenüber einer 70 kWh-Siedlung in einer ähnlichen Größenordnung (Abbildung 89).

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Wärmeversorgungskonzepten und den Energiekennwerten einer Siedlung, so lassen sich konstant über alle Gebäudetypen hinweg deutliche Abhängigkeiten und Unterschiede feststellen. Das Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] bei einer Versorgung mit Erdgas liegt bei einem Energiekennwert von 70 kWh um 41,5 % höher als bei einem Energiekennwert von 15 kWh. Dieser Unterschied beträgt bei einer Versorgung durch Luftwärmepumpe 31,9 %, bei einer Wärmeversorgung mit Kalter Nahwärme sogar nur noch bei lediglich 22,4 % (Abbildung 90).

Der Energiekennwert spielt also bei Erdgas eine deutlich höhere Rolle als bei den Varianten mit LWP und Nahwärme. Im Durchschnitt hat eine Siedlung mit Erdgas ein 23,8 % höheres GWP als eine Siedlung mit Wärmepumpe und ein 8,8 % höheres GWP als eine Siedlung mit kalter Nahwärmeversorgung (Abbildung 91).

Weitere Rückschlüsse erlaubt der Vergleich von jeweils 54 Siedlungsvarianten in Holzbauweise (nur mit Gittererschließung) differenziert nach dem Energiekennwert (Abbildung 61). Die Ergebnisse für die Varianten mit den Energiekennwerten 15 und 30 kWh sind einander sehr ähnlich und liegen im Gesamt-GWP im niedrigsten Bereich zwischen ca. 9,5 bis 11,8 kg/m² a bzw. bei 500 bis 600 kg pro Person und zwischen ca. 14 und 18 kg/m² a bzw. 800 und 1.200 kg pro Person im höchsten Bereich. Vor allem im Bereich der besten Varianten ist eine relativ hohe Übereinstimmung der Siedlungsvarianten bei den Indikatoren erkennen, die signifikant durch die Wahl der Wärmeversorgungsanlagen beeinflusst werden.

Abbildung 88:

Gegenüberstellung des flächenbezogenen GWP im Mittel aller Varianten mit drei verschiedenen Energiekennwerten [kg CO₂ eq/m² NRF *a]

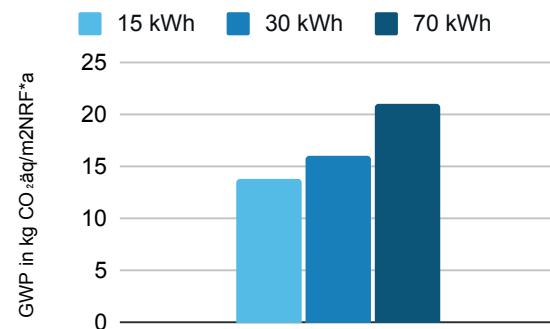


Abbildung 89:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] bei unterschiedlichen Energiekennwerten im Vergleich zu einem Energiekennwert von 70 kWh (in Prozent)

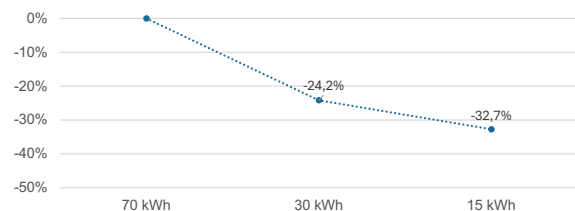


Abbildung 90:

Gegenüberstellung des flächenbezogenen GWP im Mittel aller Varianten mit drei verschiedenen Wärmeversorgungsarten

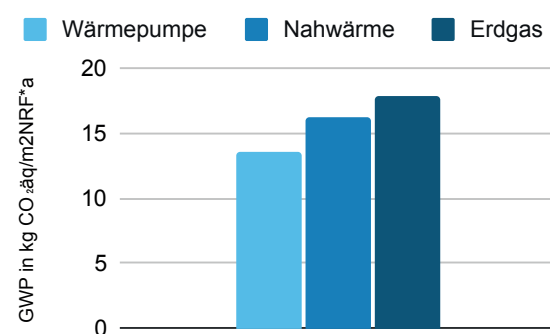
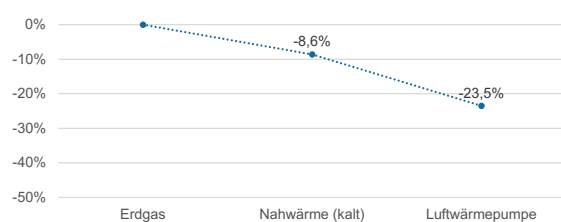


Abbildung 91:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] bei unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepten im Vergleich zu einer Wärmeversorgung durch Erdgas (in Prozent)



Während der Energiekennwert und die Wärmeversorgungsanlagen einen großen Einfluss auf das Siedlungs-GWP haben, ist der Einfluss unterschiedlicher Varianten der Siedlungerschließung - Gitter-, Schlaufe- und Sackgassenerschließung - als eher gering zu bezeichnen. Im Vergleich von drei Gebäudetypen - Einfamilienhaus, Zeile und Blockrand - mit den drei unterschiedlichen Energiekennwerten und den drei Ausprägungen von Wärmeversorgungsanlagen zeigt sich, dass die Siedlungsinfrastruktur bei ansonsten gleicher Bauausführung jeweils nur marginale Unterschiede ausmacht.

7.1.6 Siedlungsinfrastruktur (KG 500)

Anhand des Rankings für 54 Siedlungsvarianten, in dem das GWP für die Siedlungsinfrastruktur sortiert vom geringsten zum höchsten Erschließungsaufwand dargestellt ist, lassen sich gut quantitative Auswirkungen und kausalen Abhängigkeiten von Gebäudetypen und baulicher Dichte auf die bauliche Infrastruktur betrachten (Abbildungen 92 und 93).

Die absoluten GWP-Werte in KG 500 liegen hier zwischen 0,87 und 2,98 kg CO₂ eq/m² NRF * a. Die Spannweite zwischen dem geringsten und dem höchsten GWP bewegt sich damit ungefähr in der Größenordnung der Differenz zwischen einer mineralischen und Holzbauweise. Auf die Siedlungsvarianten mit kleinen Gebäudetypen entfällt zwar aufgrund einer geringeren Nutzflächendichte einen größeren Straßenanteil als auf jene mit großen Gebäudetypen, mit zunehmender städtebaulicher Dichte wird dieses vom GWP für die Tiefgaragen übertroffen, da die dafür erforderlichen Betonkonstruktionen sehr GWP-intensiv sind. Das niedrigste GWP mit 0,87 bis ca. 1,5 kg CO₂ eq/m² NRF * a findet sich bei den Siedlungsvarianten mit Reihen- und Doppelhaustypen, die mit hohen Gebäudetypen liegen zwischen 2 und 3 kg CO₂ eq/m² NRF * a. Nur in Einfamilienhaus-siedlungen mit geringer Dichte hat die Erschließung ebenfalls einen relevanten Anteil. Eine gitterförmige Erschließungsstruktur ist hier weniger effizient, wird üblicherweise aber auch wenig realisiert wird. Weitere Erkenntnisse zu städtebaulichen Aspekten sind in Kapitel 7.2 ausgeführt.

Abbildung 92:

Ranking der Auswertung des GWP für KG 500 - Erschließung mit Aushub am Beispiel 54 Siedlungsvarianten, Holz / Raster / 15 kWh Heizwärme in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

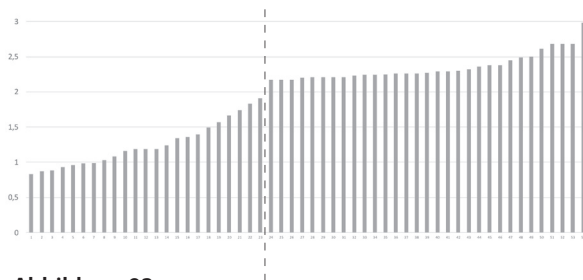
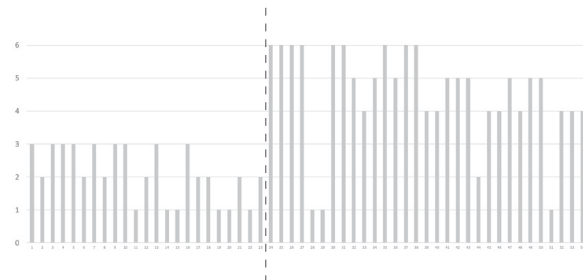


Abbildung 93:

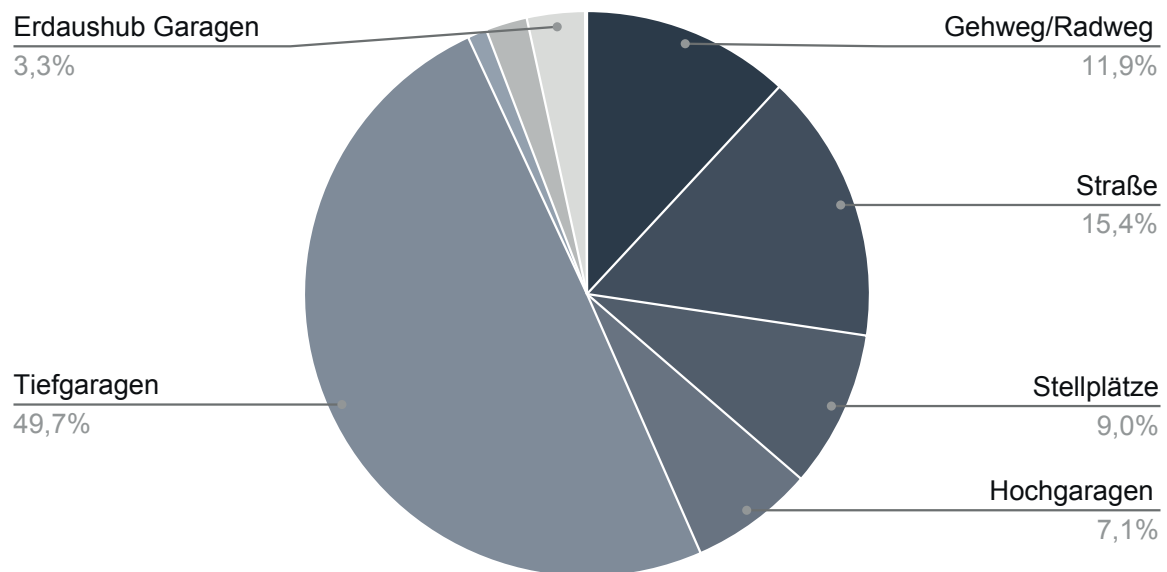
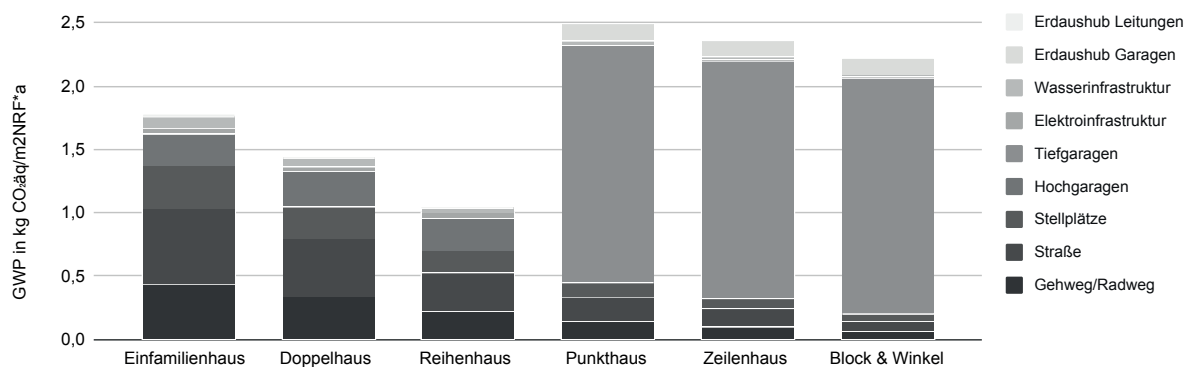
Darstellung der zum Ranking in Abbildung 91 korrespondierenden Gebäudetypen.



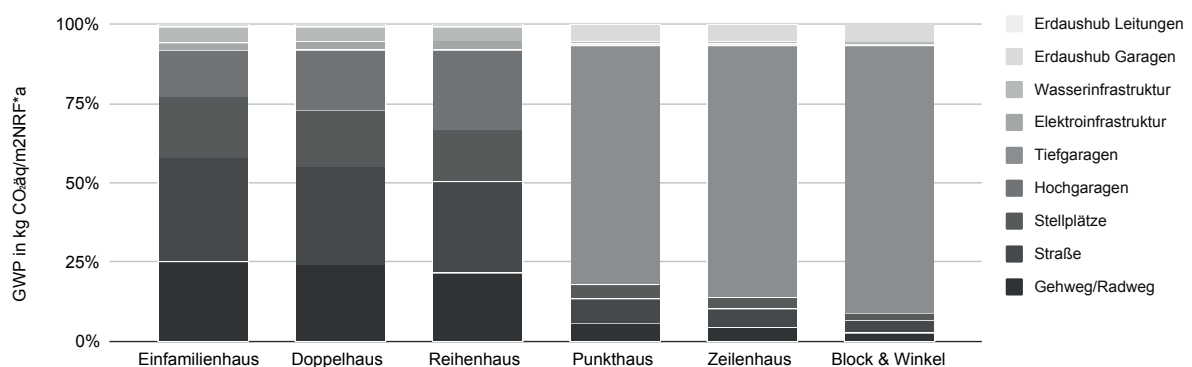
Eine Aufschlüsselung der KG 500 nach den einzelnen Bauteilgruppen zeigt nochmals den hohen Anteil der Tiefgaragen am flächenbezogenen GWP im Detail, gefolgt von Straßen, der Gehwege sowie den oberirdischen Stellplätzen. Der Aufwand für die Wasser- und Elektroinfrastruktur erscheinen im Gesamtbild vernachlässigbar (Abbildung 94). Diese wird auch sichtbar, wenn das GWP im Mittelwert für KG 500 der sechs Gebäudetypen nebeneinander in absoluten oder anteiligen Zahlen dargestellt wird (Abbildungen 95 und 96). Hier zeigt sich die Zusammensetzung des flächenbezogenen GWP zwischen großen und kleinen Gebäudetypen im Hinblick die Bereitstellung der Stellplätze noch deutlicher. Während die oberirdischen Garagen bei EFH, DH und RH nur etwa 18 % einnehmen, dominiert die Tiefgarage mit fast 84 % Anteil den GWP der großen Gebäudetypen in dieser Kostengruppe (Abbildung 90). Eine Vermeidung oder Größenreduktion von Tiefgaragen durch einen reduzierten Stellplatzschlüssel spart signifikant GWP ein (vergl. Kapitel 7.2.3). Die Auswertung des GWP in dieser Kostengruppe zeigt, dass sowohl der Anteil als auch die städtebauliche Ausformung der Siedlungerschließung eine eher geringe Bedeutung haben.

Abbildung 94:

Anteil der Bauteile am GWP der Kostengruppe 500 im Mittel aller Siedlungsvarianten in Prozent

**Abbildung 95:**Absoluter Anteil der Bauteile der Kostengruppe 500 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]**Abbildung 96:**

Relativer Anteil der Bauteile der Kostengruppe 500 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in Prozent



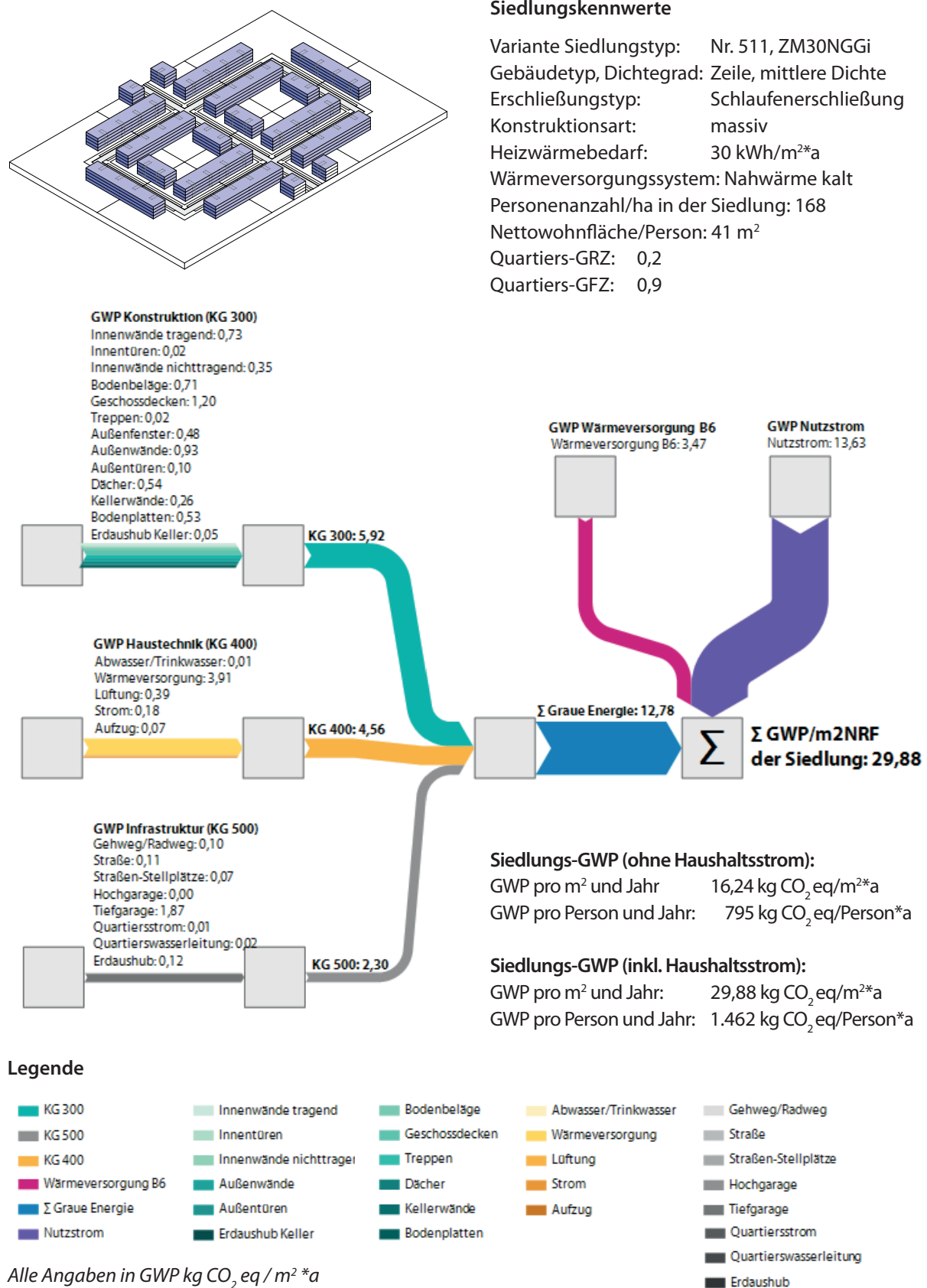
7.1.7 Datenblatt mit Sankey-Diagramm für eine typische Siedlungsvariante

Am Beispiel einer typischen und häufig vorkommenden Siedlungsvariante wurde ein exemplarisches Datenblatt erstellt. Darin sind die städtebauliche Anordnung, die bilanzierten Gebäudetypen sowie die wichtigsten Kennwerte – wie Erschließungstyp, städtebauliche Dichte, Konstruktionsart, Wärmeversorgungssystem, angenommene Bewohnerdichte und durchschnittliche Pro-Kopf-Wohnfläche – dargestellt (siehe Abbildung 97). Die Ergebnisse der Bilanzierung aller Treibhausgasemissionen dieser Siedlung beruhen auf einer statischen LCA und sind hier in einem Flussdiagramm als Sankey-Diagramm visualisiert. Die Darstellung zeigt die Ergebnisse für den Flächenindikator mit der funktionalen Einheit von einem Quadratmeter Nettoraumfläche (GWP/m² NRF) bei einer Bemessungsgrundlage von sechs Hektar Siedlungsfläche. Die Mengenflüsse des GWP sind dabei differenziert nach den Kostengruppen 300, 400 und 500, der Betriebsenergie für die Wärmeversorgung (B6) und unter Einbeziehung des Haushaltsstroms durch mengenproportionale Pfeilstärken veranschaulicht, wobei innerhalb der Kostengruppen noch die Teilflüsse ausgewiesen sind. Mit dieser Darstellungsform lässt sich die Verteilung der gebäude-, infrastruktur- und betriebsbezogenen Emissionen auf die jeweiligen Teilsysteme schnell und intuitiv erfassen.

Die klimawirksamen Emissionen ohne Haushaltsstrom betragen 16,24 kg CO₂-Äquivalente pro m² Nettogrundfläche und Jahr bzw. 795 kg CO₂-Äquivalente pro Person und Jahr. Unter Einbezug des Haushaltsstroms steigen die Emissionen signifikant auf 29,9 kg CO₂ eq/m² *a bzw. 1.462 kg CO₂ eq/Person *a. Der Anteil des Haushaltsstroms macht in dieser betrachteten Siedlungsvariante etwa 45 % des gesamten Siedlungs-GWP aus und entspricht einer Zunahme des flächen- und personenbezogenen GWP um jeweils rund 84 %, was die hohe Relevanz des Haushaltsstromverbrauchs für die Gesamtklimabilanz eines Quartiers unterstreicht. Besonders im Kontext ambitionierter Klimaziele – etwa der Einhaltung eines individuellen CO₂-Budgets zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C – fällt der Emissionsanteil des Haushaltsstroms stark ins Gewicht. Bei einem durchschnittlichen Zielwert von etwa 4,5 Tonnen CO₂ eq pro Person und Jahr macht der Haushaltsstrom in dieser Siedlungsstruktur bereits rund ein Drittel der zulässigen Emissionen aus.

Der vergleichsweise hohe Anteil für das Wärmeversorgungssystem "kalte Nahwärme" in KG 400 (Technische Anlagen) am Gesamt-GWP ist in erster Linie auf die energieintensive Herstellung, regelmäßige Erneuerung und die Systemkomplexität dieser Wärmeversorgungstechnologie zurückzuführen, die aber über den betrachteten Lebenszyklus von 50 Jahren durch sehr geringe Emissionen im Gebäudebetrieb (B6) überkompensiert wird. Im Vergleich zum fossilen Versorgungssystem mit Erdgas findet eine Verschiebung aus dem Teilsystem B6 in die KG 400 (und KG 500) statt.

Die Ergebnisse zeigen, dass energieeffiziente Wärmeversorgung allein nicht ausreicht, um klimaverträgliche Siedlungsbilanzen zu erreichen. Ein wesentlicher Hebel zur weiteren Emissionsminderung liegt im Bereich der Haushaltsstromversorgung – etwa durch dezentrale erneuerbare Energiequellen, energieeffiziente Endgeräte und Verhaltensanpassungen der Bewohnerinnen und Bewohner.

Abbildung 97:Verteilung des flächenbezogenen GWP einer häufig vorkommenden Siedlung mit Haushaltsstrom in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

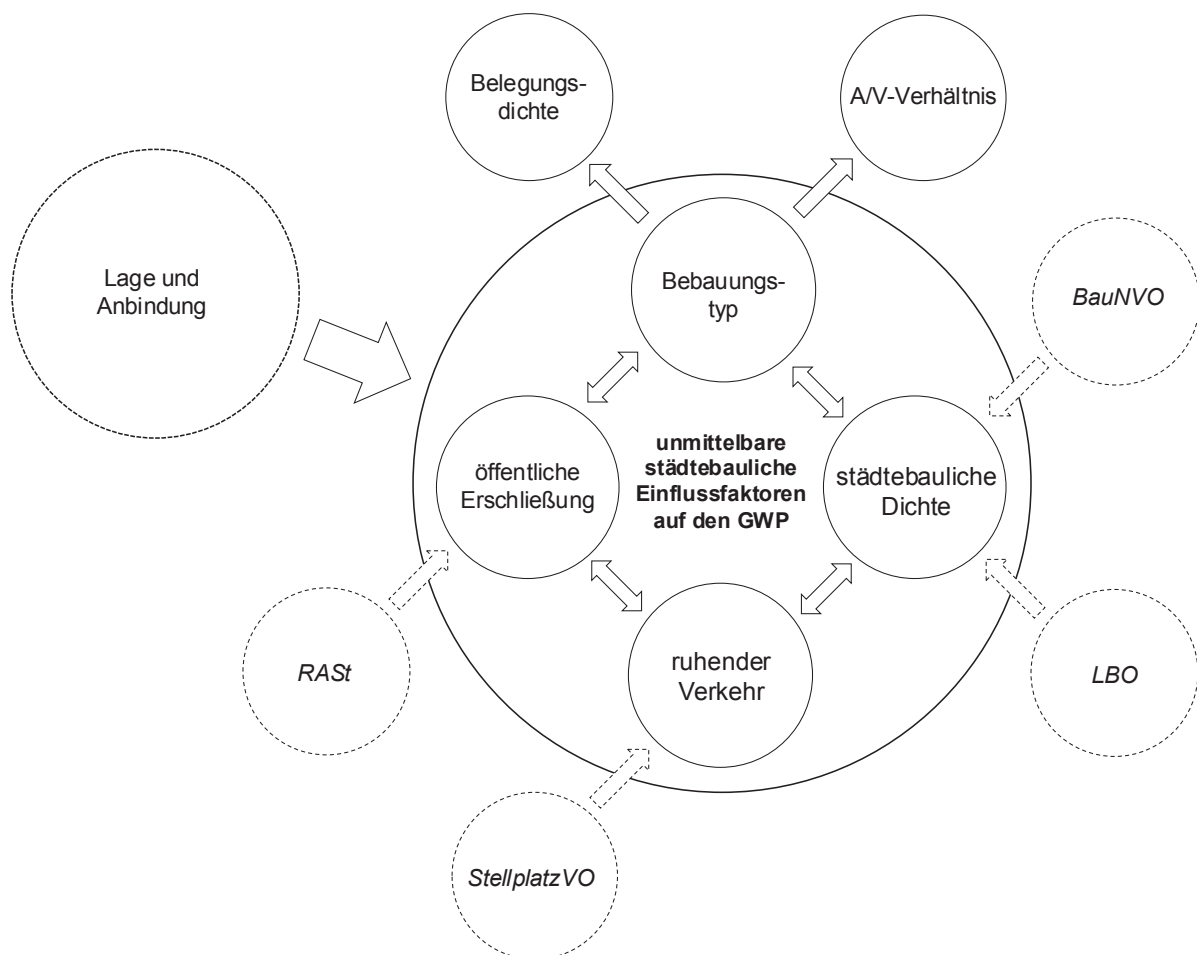
7.2 Auswertung der städtebaulichen Einflussfaktoren auf das GWP

7.2.1 Städtebauliche Einflussfaktoren und ihre Abhängigkeiten

Im Folgenden werden diejenigen Einflussfaktoren auf das GWP von Neubausiedlungen diskutiert, die im Wesentlichen durch städtebauliche Entscheidungen und deren rechtlichen Festsetzungen gesteuert werden können. Dies sind allen voran der Bebauungstyp, die städtebauliche Dichte, die öffentliche Erschließung (Straßen und Wege inkl. Kanalisation) in ihrer Form und Dimensionierung sowie die Organisation des ruhenden Verkehrs. Durch den Fokus auf diese Parameter soll veranschaulicht werden, in welcher Weise und mit welcher Wirkung durch die städtebauliche Planung - im Vergleich Gebäudeplanung oder zu anderen Bereichen der Siedlungsentwicklung - auf das Gesamt-GWP einer Siedlung Einfluss genommen werden kann (Abbildung 98).

Abbildung 98:

Darstellung der städtebaulichen Einflussfaktoren und ihrer Abhängigkeiten



Die hier betrachteten städtebaulichen Parameter sind nicht unabhängig voneinander wirksam, sondern stehen in vielfacher Weise in Wechselwirkung mit anderen Einflussfaktoren. So wirkt sich beispielsweise die Wahl des Bebauungstyps nicht nur unmittelbar auf das GWP einer Siedlung aus (zum Beispiel aufgrund des spezifischen A/V-Verhältnisses, das auf die geometrischen Eigenschaften des gewählten Typen zurückzuführen ist), sie wirkt sich auch indirekt aus, weil die Bebauungstypen auf die Belegungsdichte oder die bauliche Dichte einer Siedlung Einfluss nehmen.

Dieses Beispiel macht deutlich, dass sich keine eindeutige Aussage darüber treffen lässt, wie sich die städtebaulichen Einflussfaktoren auf das Gesamt-GWP einer Siedlung auswirken, weil sie nicht unabhängig von anderen Einflussfaktoren betrachtet werden können. Gerade jene Einflussfaktoren, wie zum Beispiel der Energiekennwert oder die Wärmeversorgung von Gebäuden, die stärker als andere Faktoren auf das Gesamt-GWP einer Siedlung wirken, können die Auswirkungen der städtebaulichen Einflussfaktoren unter Umständen in den Hintergrund treten lassen.

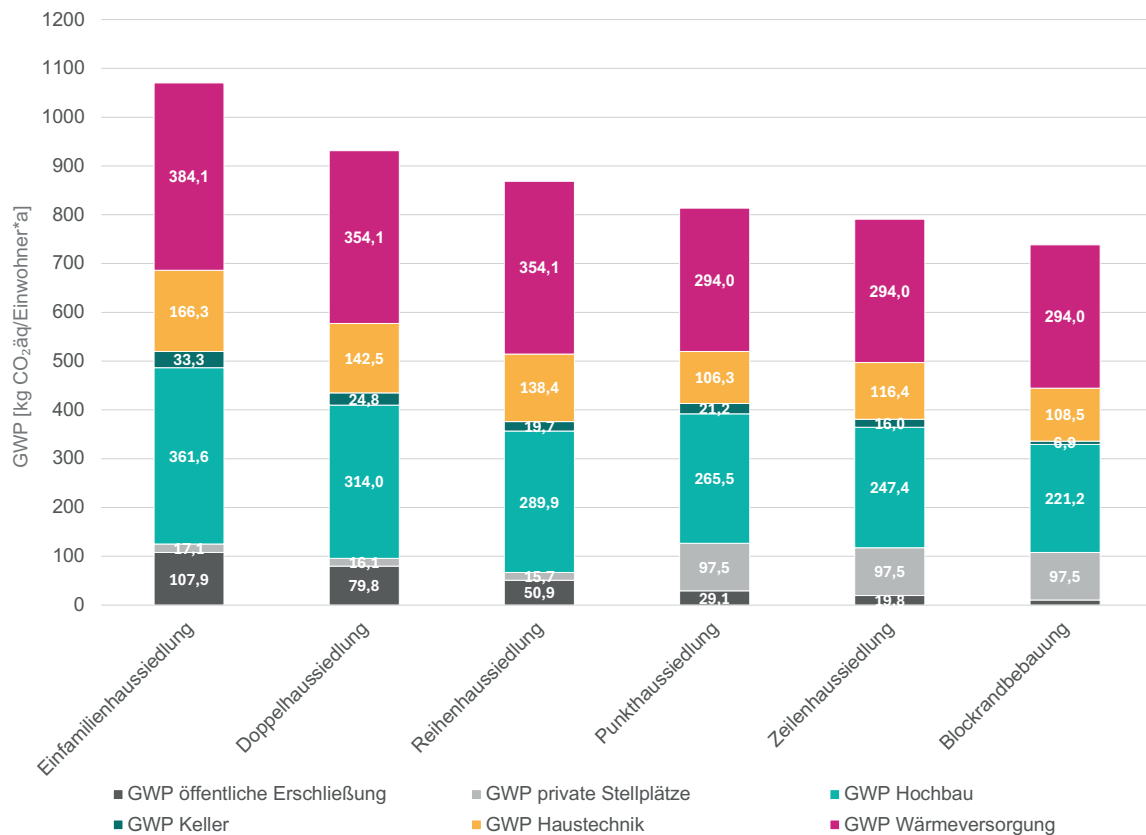
Ungeachtet der potenziellen Dominanz anderer Einflussfaktoren soll in diesem Kapitel versucht werden, eine Gewichtung der städtebaulichen Einflussfaktoren vorzunehmen. Denn städtebauliche Entscheidungen können sich erheblich auf das Gesamt-GWP einer Siedlung auswirken. Zum einen dann, wenn sie zu einem frühen Zeitpunkt innerhalb einer Siedlungsentwicklung getroffen werden und dadurch spätere Entscheidungen, insbesondere solche der Gebäudeplanung, beeinflussen. Zum anderen dann, wenn potenziell wirkmächtige Einflussfaktoren wie die Energiekennwerte oder die Wärmeversorgung nur schwach ausgeprägt sind.

Die Wirksamkeit des Städtebaus auf das GWP einer Siedlung wird nicht nur durch andere planungsrelevante Faktoren, wie von der Energieversorgung, der Verkehrsplanung oder der Gebäudeplanung beeinflusst, sondern auch durch externe Faktoren, insbesondere durch Verordnungen und Richtlinien. Beispiele hierfür sind die Stellplatzverordnungen, die die Anzahl der zu realisierenden Stellplätze pro Wohneinheit festlegen oder die Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt), die die Dimensionierung der Straßenquerschnitte unterschiedlicher Straßentypen bestimmen. Auch die Abstandsregelungen, die von Bundesland zu Bundesland variieren, wirken sich darauf aus, inwieweit die städtebaulichen Mittel für eine GWP-reduzierte Siedlungsplanung ausgeschöpft werden können.

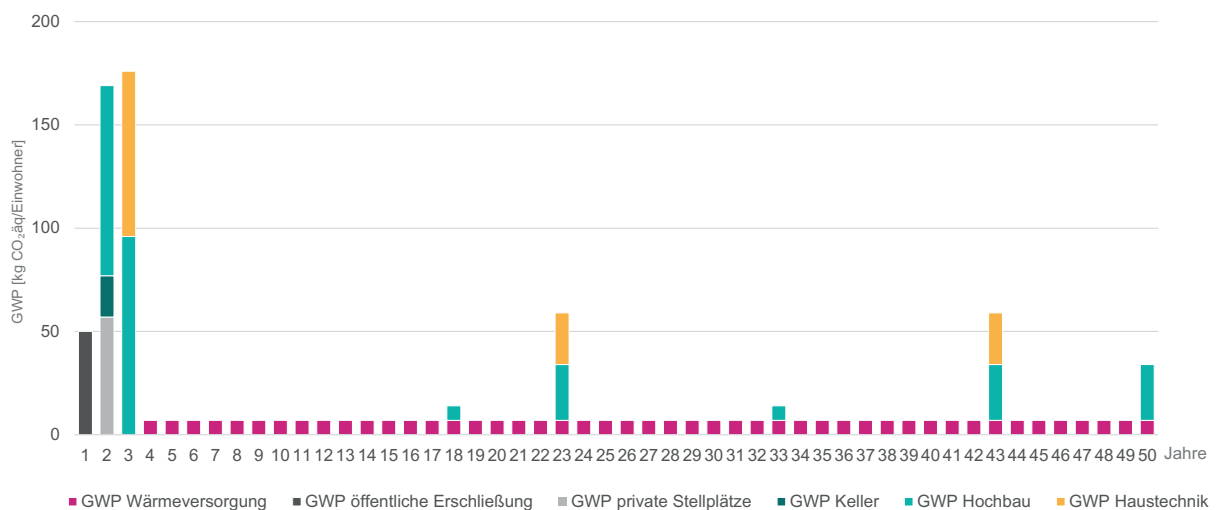
Nicht zuletzt wird die Wirksamkeit des Städtebaus auch durch die Lage und die verkehrliche Anbindung einer Siedlung beeinflusst. So konnten in der vorliegenden Untersuchung des Siedlungsgeschehens in Deutschland Abhängigkeiten zwischen den Lagemerkmalen einer Siedlung und der Erschließung, der Dichte und den Bebauungstypen festgestellt werden (Kapitel 4).

Betrachtet man zunächst das durchschnittliche Pro-Kopf-GWP unterschiedlicher Bebauungstypen über alle Bauweisen, Energiekennwerte und Wärmeversorgungsarten hinweg, so lässt sich erstens ein erheblicher Einfluss des Bebauungstyps auf die Energieeffizienz einer Siedlung feststellen (Abbildung 99). Zweitens zeigen die Zusammensetzungen der jeweiligen Gesamt-GWPs nach Ursprungsart teilweise deutliche Unterschiede auf. In den nachstehenden Kapiteln werden diejenigen Einflussfaktoren, die in erster Linie in städtebaulichen Entscheidungen begründet liegen, entsprechend differenziert ausgewertet.

Betrachtet man die Verteilung des durchschnittlichen GWP der hier analysierten Siedlungen hinsichtlich des Zeitpunkts, an dem es verursacht wird, dann kann festgestellt werden, dass knapp die Hälfte des Gesamt-GWP bereits durch den Bau der Siedlung sowie die vorgelagerten Herstellungsprozesse verursacht wird. Das bedeutet, dass dieser Anteil am Gesamt-GWP in vergleichsweise kurzer Zeit emittiert wird und vor allem von den beteiligten Akteuren aus Bauwirtschaft und Baustoffindustrie beeinflusst werden kann.

Abbildung 99:Gesamt-GWP [kg CO₂eq/Person*a] unterschiedlicher Bebauungstypen nach Einflussfaktoren (Mittelwerte)

Der verbleibende Anteil am Gesamt-GWP ist auf die Erzeugung von Heizwärme und auf andere Energiebedarfe zurückzuführen. Dieser Anteil am Gesamt-GWP erstreckt sich über die gesamte Nutzungsphase der Siedlung, was bei einer rechnerischen Lebensdauer von 50 Jahren weniger als 1,5 % pro Jahr am Gesamt-GWP entspricht (Abbildung 100). Dieser Anteil kann einerseits durch das Heizverhalten der Bewohner*innen beeinflusst werden, aber mittelbar auch durch Architekt*innen und Fachplaner und Energieversorger.

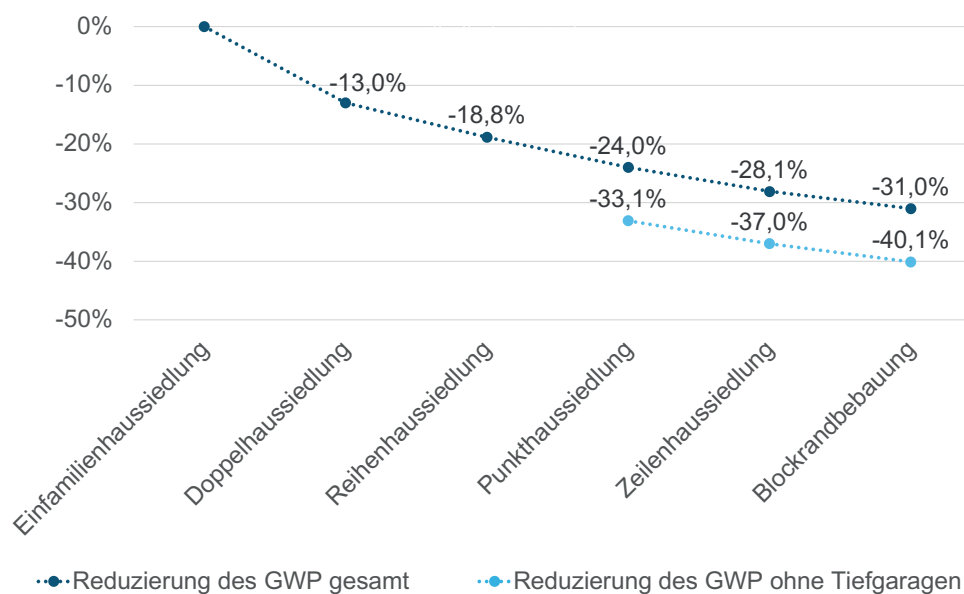
Abbildung 100:Schematische Verteilung des erzeugten GWP einer Neubausiedlung [kg CO₂eq/Person*a] nach Jahren (gruppiert nach Einflussfaktoren; Mittelwerte)

7.2.2 Einfluss des Bebauungstyps, der baulichen Dichte und der Belegungsdichte

Einer der wesentlichsten Hebel zur Reduktion des GWP besteht für Stadtplaner potenziell in der Wahl des Bebauungstyps. Im Mittel weisen die untersuchten Mehrfamilienhausbebauungen ein deutlich geringeres Gesamt-GWP auf, als Einfamilien-, Doppel- oder Reihenhaussiedlungen. So hat eine Blockrandbebauung - wenn für alle anderen der Bilanzierung zugrunde liegenden Einflussfaktoren die erhobenen Durchschnittswerte angenommen werden - ein um 31 % geringeres GWP pro Person als eine Einfamilienhaussiedlung (Abbildung 101).

Abbildung 101:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] unterschiedlicher Bebauungstypen im Vergleich zu einer Einfamilienhaussiedlung (in Prozent)



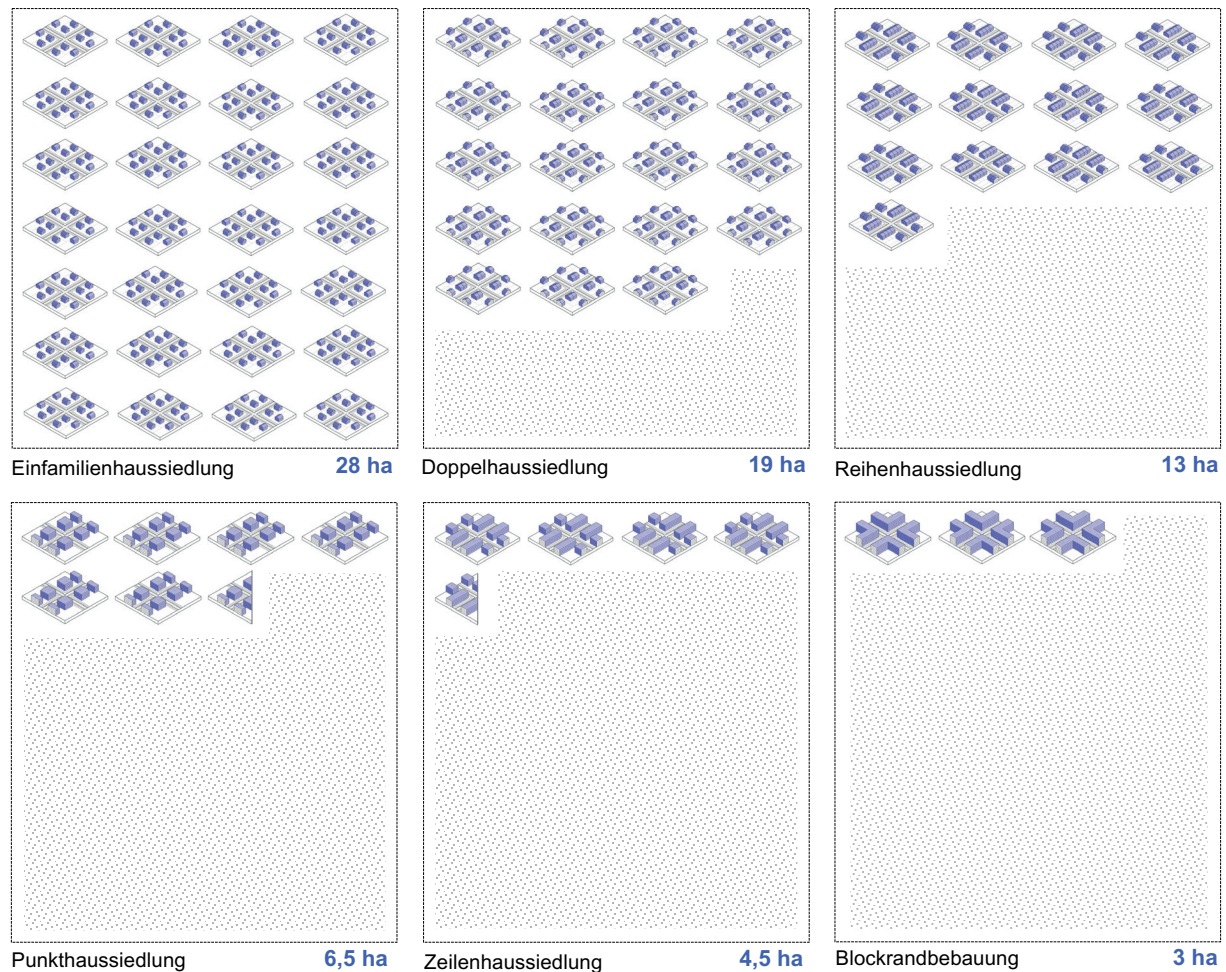
Ein weiterer Hebel zur Reduktion des GWP liegt in der Organisation des ruhenden Verkehrs. Dies trifft in besonderem Maße auf die Tiefgaragen zu, die bei den hier analysierten Blockrandbebauungen einen Anteil von 13 % am Gesamt-GWP ausmachen. Durch den Verzicht auf eine Tiefgarage ließe sich das GWP einer Blockrandbebauung im Vergleich zum GWP einer Einfamilienhaussiedlung um weitere 10 % reduzieren (siehe auch Kapitel 7.2.3). Zu beachten ist hierbei, dass auch bei diesem Vergleich für alle anderen Einflussfaktoren wie Bauweise, Energiekennwert und Wärmeversorgungsart die erhobenen Durchschnittswerte eingesetzt wurden. Vor allem aufgrund der Wirkmächtigkeit des Energiekennwerts und der Wärmeversorgung einer Siedlung (siehe Kapitel 7.1), kann es in Einzelfällen sogar dazu kommen, dass unter bestimmten Voraussetzungen beispielsweise eine Einfamilienhaussiedlung ein besseres GWP pro Kopf aufweist als eine Blockrandbebauung (Abbildung 101).

Dass Siedlungen mit größer dimensionierten Gebäuden im Schnitt eine positivere Energiebilanz aufweisen als Siedlungen mit kleineren Bebauungstypen, hat mehrere Gründe und hängt unter anderem mit einem geringeren Pro-Kopf-Verbrauch an Baustoffen und an Heizenergie zusammen. Zudem können die technischen und verkehrlichen Infrastrukturen in Siedlungen mit einer höheren Dichte effizienter genutzt werden als in Siedlungen mit geringer Dichte.

Es ist zudem zu beachten, dass auch die Flächenneuanspruchnahme pro Person in großer Abhängigkeit zu dem Bebauungstyp steht. So wird beispielsweise für die Errichtung einer Einfamilienhaussiedlung mittlerer Dichte für 1.000 Einwohner mehr als neunmal so viel Fläche in Anspruch genommen als für die Errichtung einer Blockrandbebauung mit gleicher Einwohnerzahl (Abbildung 102).

Abbildung 102:

Vergleich des Flächenverbrauchs von 1.000 Personen bei unterschiedlichen Bebauungstypen jeweils mittlerer Dichte



Der Flächenverbrauch hat nicht nur negative Auswirkungen auf Böden und Natur, sondern er führt auch zum Anstieg der technischen Infrastrukturen, der Verkehrsflächen, der erzeugten Verkehre und - daraus resultierend - auch zu höheren Stellplatzbedarfen. Insbesondere ist durch zunehmende Flächeninanspruchnahmen mit einem deutlichen Anstieg des CO₂-Ausstoßes durch den motorisierten Individualverkehr zu rechnen, dessen Einfluss allerdings in vorliegender Untersuchung nicht in das GWP pro Person einfließt.

In der vorliegenden Betrachtung wird davon ausgegangen, dass sich die Pro-Kopf-Wohnfläche bei verschiedenen Gebäudetypen voneinander unterscheidet, was sich entsprechend auf das GWP pro Person auswirkt. Je nach Lage einer Wohnung (Gemeindetyp), der Eigentumsverhältnisse der Bewohner*innen (Mieter*innen oder Eigentümer*innen), ihrer Lebenssituation (Singles, Paare, Familien) oder ihrem Alter hat der Wohnflächenbedarf in Deutschland ein Spektrum von unter 30 m² bis über 80 m² pro Person (vgl. Statistisches Bundesamt, 2024: Haushalte nach Haushaltsgröße und Haushaltsmitgliedern nach Bundesländern im Jahr 2023). In der vorliegenden Untersuchung wird berücksichtigt, dass der Wohnflächenbedarf bei Mehrfamilienhäusern rund 20 % unter dem von Einfamilienhäusern liegt (vgl. Wegner et al. 2024, siehe auch Kapitel 7.1).

Die Wirkmächtigkeit der Belegungsdichte auf das Gesamt-GWP einer Siedlung können die folgenden Daten verdeutlichen: Bei einer Reduktion der Wohnfläche um 5 m² pro Person im Vergleich zum heutigen Wohnflächenverbrauch, sinkt der Gesamt-GWP einer Siedlung pro Person und Jahr im Schnitt um rund 12 %, bei einer Reduktion von 10 m² pro Person sogar um fast ein Viertel (Abbildung 103).

Suffizientere Lebensstile in Form von kleineren Wohnungen oder gemeinschaftlichen Wohnformen bergen folglich ein überaus großes Einsparpotenzial in Bezug auf die Treibhausgasemissionen einer Siedlung. Diese Einsparpotenziale könnten größere Wirkung erzielen und zugleich kostengünstiger umgesetzt werden, als es durch die meisten anderen Einflussfaktoren möglich ist.

Auch durch den folgenden Vergleich kann die Wirkmächtigkeit des Faktors Belegungsdichte auf das GWP eingeordnet werden: Wird beispielsweise eine Wohneinheit von 70 Quadratmetern in einer Zeilenbebauung mittlerer Dichte (Massivbau, Versorgung durch Kalte Nahwärme) und einem Energiekennwert von 15 kWh durch eine einzige Person bewohnt, so ist das GWP [kg CO₂ eq*a] dieser Person über 1,5 mal so hoch wie dasjenige GWP einer Person, die in einem vergleichbaren Gebäude wohnt welches zwar einen deutlich schlechteren Energiekennwert von 70 kWh hat, aber sich diese Wohnung mit einer weiteren Person teilt (siehe Abbildung 104).

Ein weiterer Grund dafür, dass das GWP pro Person in Gebäudetypen mit großem Volumen tendenziell geringer ausfällt als in Gebäudetypen mit kleinem Volumen, liegt in dem günstigeren Verhältnis von beheiztem Innenraum zur Außenfläche der Gebäude, was geringere Wärmeverluste zur Folge hat. Zum Vergleich: Die Außenfläche der hier untersuchten Einfamilienhäuser fällt pro Kopf knapp viermal so hoch aus wie bei den hier untersuchten Blockrandbebauungen (Abbildung 105).

In der Mehrzahl weisen vor allem die ökologisch besonders effizienten Zeilenhaussiedlungen und Blockrandbebauungen eine höhere Dichte auf als die restlichen Bebauungstypen. Bei einer Betrachtung der Treibhausgasemissionen pro Person einer Siedlung hinsichtlich ihrer Dichte, lassen sich diese Interdependenzen erkennen: Es entstehen mittlere Effizienzvorteile von 22,3 % bei Siedlungen mit einer

Abbildung 103:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂eq/Person*a] durch die Verringerung der Wohnfläche pro Person (in Prozent)

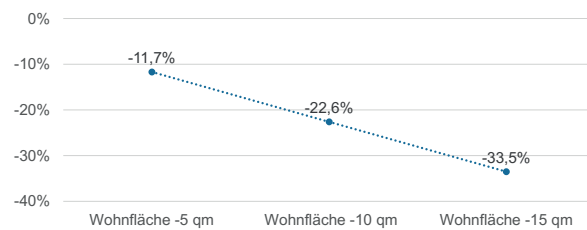


Abbildung 104:

Wirkmächtigkeit der Belegungsdichte im Verhältnis zur Wirkmächtigkeit des Energiekennwerts auf das GWP [kg CO₂ eq/Person*a] am Beispiel einer Wohnung von 70 m² (Zeilenbebauung mittlerer Dichte, Massiv, Nahwärme kalt)

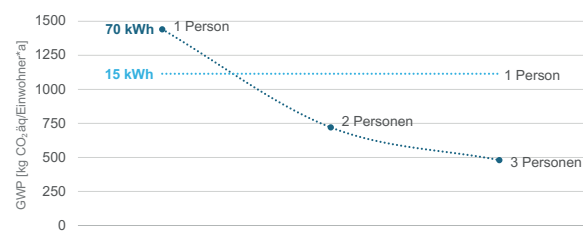
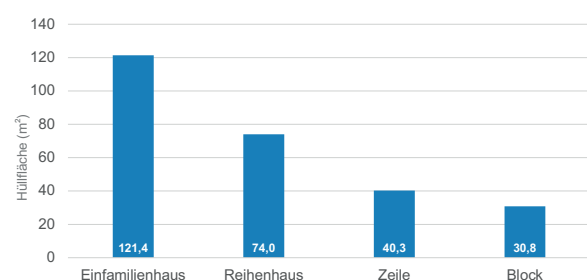


Abbildung 105:

Hüllflächen unterschiedlicher Bebauungstypen pro Person (Mittelwerte, in m²)



verhältnismäßig hohen Dichte (Quartiers-GFZ 1,8-2,1) gegenüber Siedlungen mit verhältnismäßig geringer Dichte (0,2-0,5). Dabei ist es allerdings auffällig, dass ab einer gewissen Dichte (Quartiers-GFZ ab 1,0) die Effizienzvorteile deutlicher geringer werden: Bei einer Verdoppelung der Quartiers-GFZ von 1,0 auf 2,0 reduziert sich das GWP gegenüber einer Siedlung sehr geringer Dichte (Quartiers-GFZ 0,2-0,5) nur noch um 4,5 % (siehe Abbildung 106).

Entsprechend verhält es sich bei einem Vergleich der Effizienzvorteile durch die Erhöhung der Dichten innerhalb der jeweiligen Bebauungstypen. Bei den Bebauungstypen, die ohnehin die höchsten städtebaulichen Dichten aufweisen (Zeilenhaussiedlungen und Blockrandbebauungen), lassen sich durch die Erhöhung der Dichten in der vorliegenden Untersuchung nur noch vergleichsweise geringe Vorteile erzielen (bis zu 4,8 % bei Blockrandbebauungen), wohingegen sich bei Einfamilienhaus- und Doppelhaussiedlungen durch die Erhöhung der Dichten bis zu 15,2 % bzw. 13 % GWP einsparen lassen (Abbildung 107).

Ein Grund dafür, dass sich durch die Erhöhung der Dichte bei Mehrfamilienhaussiedlungen tendenziell nicht mehr so deutliche Effizienzvorteile erzielen lassen, ist, dass sich mit der zunehmenden Dichte auch Faktoren potenzieren, die sich negativ auf das GWP auswirken, wie beispielsweise zusätzliche Stellplatzbedarfe oder ein höherer Konstruktionsanteil. Auch die bauordnungsrechtlich geforderten Abstandsflächen wirken sich auf die Betrachtung aus. So wird bei einer Punkthausbebauung die maximale GFZ bei Einhaltung der Abstandsflächen von 0,4 H in der Regel bereits nach 6 Geschossen erreicht und damit bei dieser Geschosshöhe auch die beste Wirkung in Bezug auf den Ressourcenverbrauch und die Treibhausgasemissionen erzielt (Abbildung 108).

7.2.3 Einfluss öffentlicher Erschließungsflächen und ruhender Verkehr

Der Anteil der öffentlichen Erschließungsflächen an den gesamten Treibhausgasemissionen einer Siedlung über ihren Lebenszyklus liegt im Durchschnitt aller betrachteten Bebauungstypen bei lediglich 5,35 %. Selbst wenn die Erschließungsflächen der untersuchten Siedlungstypen um 50 % reduziert würden, verringerte sich ihr Anteil am Gesamt-GWP im Schnitt um gerade einmal um 2,5 % (Abbildung 109).

Abbildung 106:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] durch höhere Quartiersdichten im Vergleich zu Siedlungen mit einer geringen Dichte (Quartiers-GFZ zwischen 0,2 und 0,5). Zur Berechnung Siedlungsdichte siehe Tabelle 4, S.66

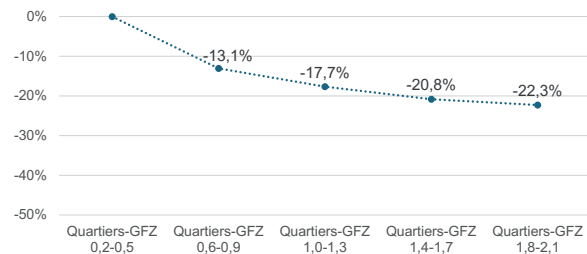


Abbildung 107:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] durch eine Bebauung hoher Dichte im Vergleich zu einer Bebauung geringer Dichte, unterteilt in Bebauungstypen (in Prozent).

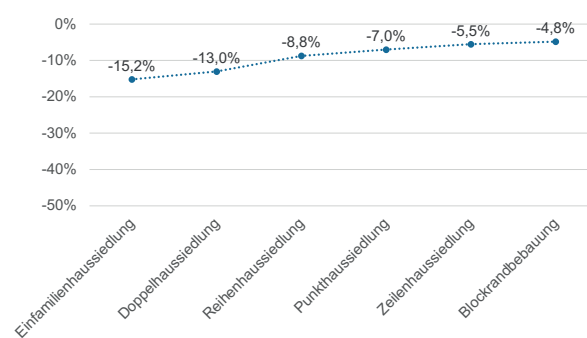


Abbildung 108:

Maximal erreichbare GFZ in Abhängigkeit der Geschosse bei Einhaltung der Abstandsflächen von 0,4 H nach Bebauungstyp

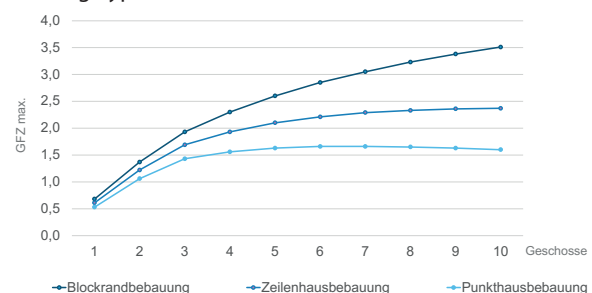
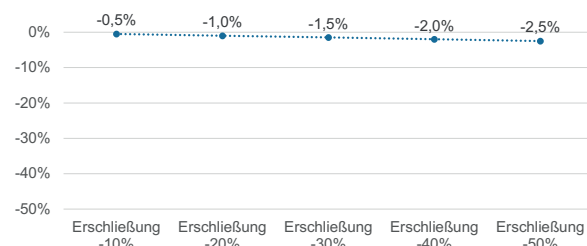


Abbildung 109:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] durch die Verringerung öffentlicher Erschließungsflächen (in Prozent)



Auch die morphologischen Unterschiede der drei untersuchten Erschließungstypen Schlaufenerschließung, Sackgassenerschließung und Gittererschließung wirken sich nur unwesentlich aus. Ihr Anteil am Gesamt-GWP einer Siedlung unterscheidet sich nur um 1,5 %. Am höchsten ist der Anteil der öffentlichen Erschließungsflächen und der technischen Ver- und Entsorgung am Gesamt-GWP bei Einfamilienhaus-siedlungen. Hier ist die Erschließungsfläche pro Kopf im Schnitt mit 53 m² sechsmal so hoch wie bei einer Blockrandbebauung (Abbildung 110). Entsprechend unterscheiden sich die Auswirkungen der öffentlichen Erschließung auf das Gesamt-GWP einer Siedlung je nach Bebauungstyp deutlich voneinander.

Die Treibhausgasemissionen, die der Erschließung eines Einfamilienhausgebietes pro Person und Jahr zuzuordnen sind, liegen im Schnitt bei rund 108 kg CO₂eq, was einen Anteil von 10,1 % an der Gesamtemission ausmacht, während sie sich bei einer Blockrandbebauung im Schnitt auf nur 10 kg CO₂ eq belaufen (1,4 % des Gesamt-GWP).

Durch die Reduktion der Erschließungsflächen – ob durch die Wahl effizienterer Erschließungstypen oder eine Verringerung der Straßenquerschnitte – lassen sich entsprechend lediglich bei Einfamilienhaus-, Doppelhaus- und Reihenhaussiedlungen nennenswerte ökologische Vorteile erzielen (Abbildung 111).

Bei Siedlungen mit einer tendenziell höheren Dichte Punkt- und Zeilenhaussiedlung sowie Blockrandbebauungen) liegt der Effizienzgewinn bei einer Reduzierung der Verkehrsflächen um 50 % im Schnitt bei unter einem Prozent.

Im Gegensatz zu der öffentlichen Erschließung stellen die Art und die Anzahl der Stellplätze einen vergleichsweise großen Hebel zur Optimierung des GWP einer Siedlung dar. Im vorliegenden Rechenmodell wurde bei Geschosswohnungsbauten von einem Stellplatz pro Wohneinheit ausgegangen und dieser in Tiefgaragen nachgewiesen. Bei diesem Stellplatzschlüssel fallen die Treibhausgasemissionen, die für den Bau einer entsprechend ausgelegten Tiefgarage anfallen, zehnmal höher aus als für einen Straßenstellplatz (siehe Abbildung 112). Dies ist zum einen auf den Aushub und die Konstruktion zurückzuführen, die für den Bau einer Tiefgarage erforderlich sind, und zum anderen auch darauf, dass Tiefgaragen im Gegensatz zu Straßenflächen zusätz-

Abbildung 110:
Öffentliche Verkehrsfläche pro Person nach Bebauungstyp (Mittelwert, in m²)

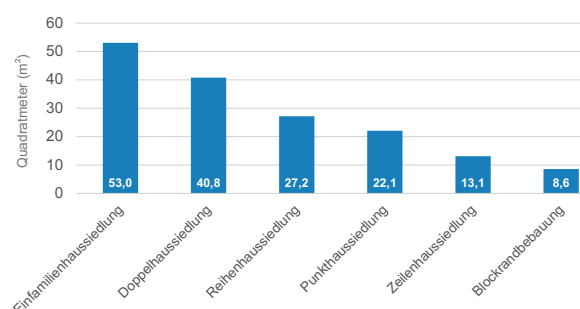


Abbildung 111:
Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] durch die Verringerung öffentlicher Erschließungsflächen nach Bebauungstyp (in Prozent)

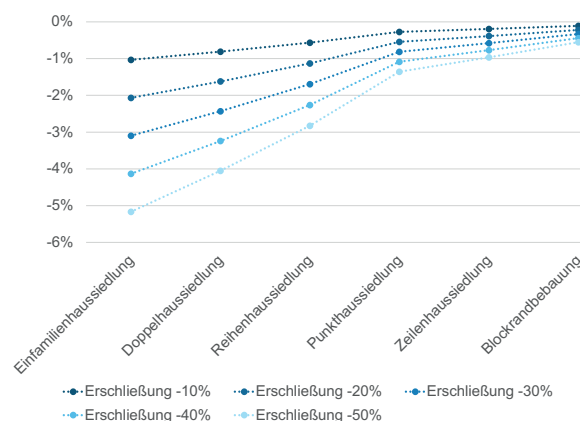
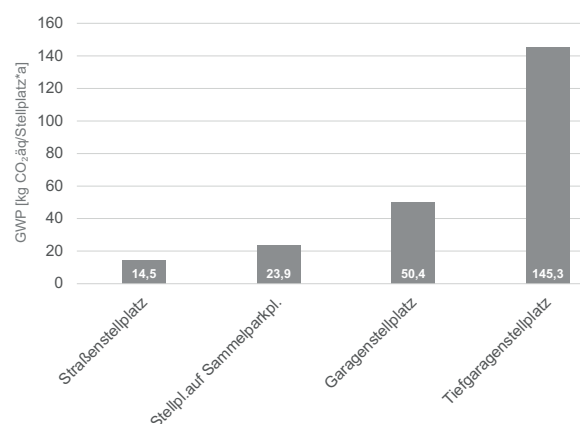


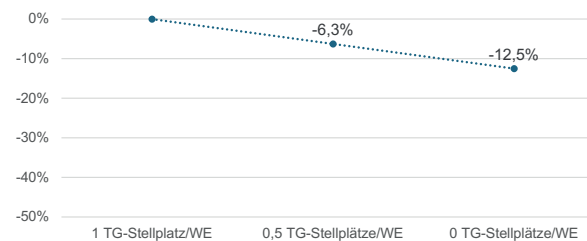
Abbildung 112:
GWP [kg CO₂ eq/Stellplatz*a] unterschiedlicher Stellplatztypen)



liche Erschließungsflächen erfordern (Fahrspuren, Rampen). Als Folge liegt der Anteil der privaten Stellplätze am Gesamt-GWP gemäß der oben erläuterten Kalkulation bei Mehrfamilienhäusern im Schnitt bei 12,5 %. Durch die Halbierung der Anzahl von Tiefgaragenstellplätzen könnte demnach ein Effizienzvorteil von 6,3 % am Gesamt-GWP der Siedlungen erreicht werden (Abbildung 113). Dies würde einerseits durch den Verzicht eines Stellplatzschlüssels in Kombination mit einer guten Anbindung an den öffentlichen Personennahverkehr unterstützt, andererseits durch die Organisation des ruhenden Verkehrs durch Straßen- oder Sammelparkplätze.

Abbildung 113:

Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO₂ eq/Person*a] durch die Verringerung der Anzahl von Tiefgaragenstellplätzen bei Mehrfamilienhäusern im Vergleich zu einem Stellplatz pro Wohneinheit (in Prozent)



7.3 Dynamisierung der LCA – Methodik und Relevanz

Da die Annahme eines statischen Betrachtungszeitraums zu defizitären Ergebnissen bei der Ökobilanz führt (König 2017; Sohn et al. 2020), werden ergänzend zu der in Kapitel 6.1 getroffenen Festlegung einer zeitlichen Bilanzgrenze von 50 Jahren, im Folgenden Szenarien einer statischen und dynamischen Betrachtung der Treibhausgasemissionen (GWP) über einen Zeitraum von 50 Jahren untersucht. Insbesondere im Kontext von stark veränderlichen Systemen, wie dem Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung, ist es sinnvoll, eine dynamische Perspektive vorzunehmen, da sich die GWP-Emissionen im Zeitverlauf ändern können (Sohn et al. 2020). Eine aktuelle Metastudie verweist darauf, dass insbesondere die Dekarbonisierung des Energiesystems, technologische Entwicklungen von Herstellungsprozessen und Veränderungen im Nutzungsverhalten wesentliche dynamische Faktoren sind, welche zukünftige LCA-Analysen stärker berücksichtigen sollten (Slavkovic/Stephan 2025). Da die künftige Entwicklung stark von politischen und makroökonomischen Rahmenbedingungen abhängt, wurde für die Szenarienbildung ein vereinfachter Ansatz mit einer jährlichen Dekarbonisierung des Energiemixes von 12 % angenommen. Dies entspricht dem Erreichen des Bundes-Klimaschutzgesetzes bis 2045. Die strombasierten Betriebsemissionen B6 werden in der dynamischen Betrachtung somit degressiv dargestellt. Die Dekarbonisierung von bauteil- und anlagenbezogenen Austauschzyklen ist deutlich komplexer, da für unterschiedliche Materialien und Herstellungsprozesse unterschiedliche Dekarbonisierungspfade entwickelt werden müssen. (Agora Industrie, 2024). Im Rahmen dieser Betrachtung wurde für austauschbedingte Emissionen der KG 300 und KG 400 eine überschlägliche Degression von 5 % angenommen.

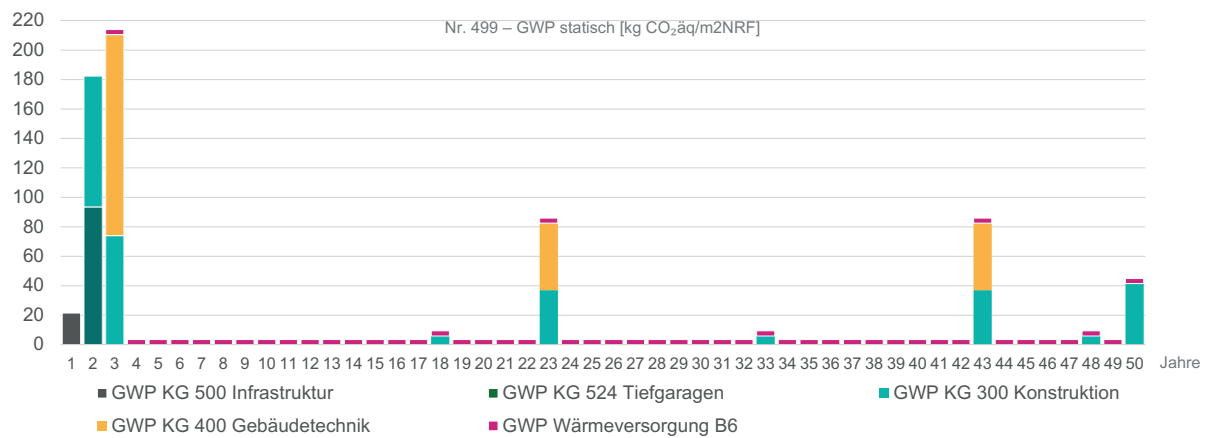
Untersucht wurden die typisierte Siedlungsvariante Zeilenhaus, massive Bauweise, 30 kWh/m²a, mittlere Dichte mit den drei unterschiedlichen Energieversorgungsarten Kalte Nahwärme (Varianten-Nr. 499), Luft-Wasser-Wärmepumpe (Varianten-Nr. 500) und Erdgas (Varianten-Nr. 501).

Die Abbildungen 114, 115 und 116 zeigen die zeitliche Verteilung des GWP/m² NRF über 50 Jahre für die drei Energieversorgungsvarianten. Dargestellt sind hierbei die Emissionen der Herstellung und Errichtung GWP für KG 300 Konstruktion, KG 400 Gebäudetechnik und KG 500 Infrastruktur sowie KG 524 Tiefgaragen (Jahr 1–3), die laufenden Betriebsemissionen B6 über die gesamte Nutzungsdauer sowie die austauschbedingten Emissionen der KG 300 und KG 400 während der Nutzungsphase, welche durch den Ersatz von Bauteilen und gebäudetechnischen Komponenten in festgelegten Intervallen entstehen.

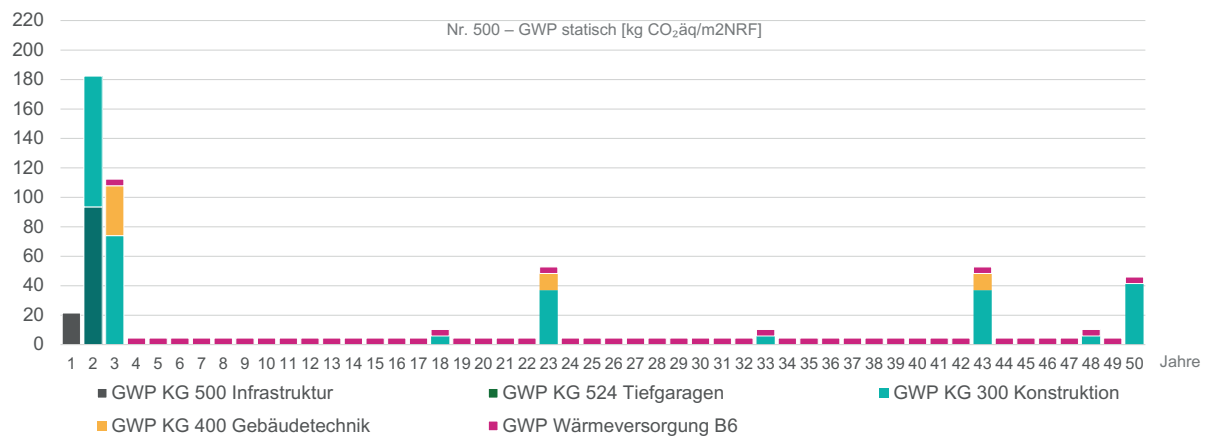
In den Abbildungen 117, 118 und 119 wird dasselbe Szenario mit einer vereinfachten dynamisierten Emissionsbewertung dargestellt. Hierbei wurde eine jährlich sinkendes GWP des Strommixes (12 % Degression) berücksichtigt, wodurch insbesondere die Betriebsemissionen der strombasierten Systeme stark beeinflusst werden. Zusätzlich berücksichtigt diese dynamische Betrachtung auch die grauen Emissionen beim Austausch von Bauteilen und Technik, welche sich durch den zunehmend emissionsärmeren Strommix langfristig reduzieren.

Abbildung 114:

Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP [kg CO₂eq/m² NRF], hier Variante Nr. 499: Kalte Nahwärme

**Abbildung 115:**

Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP [kg CO₂ eq/m² NRF], hier Variante Nr. 500: Luft-Wasser-Wärmepumpe

**Abbildung 116:**

Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP [kg CO₂ eq/m² NRF], hier Variante Nr. 501: Erdgas

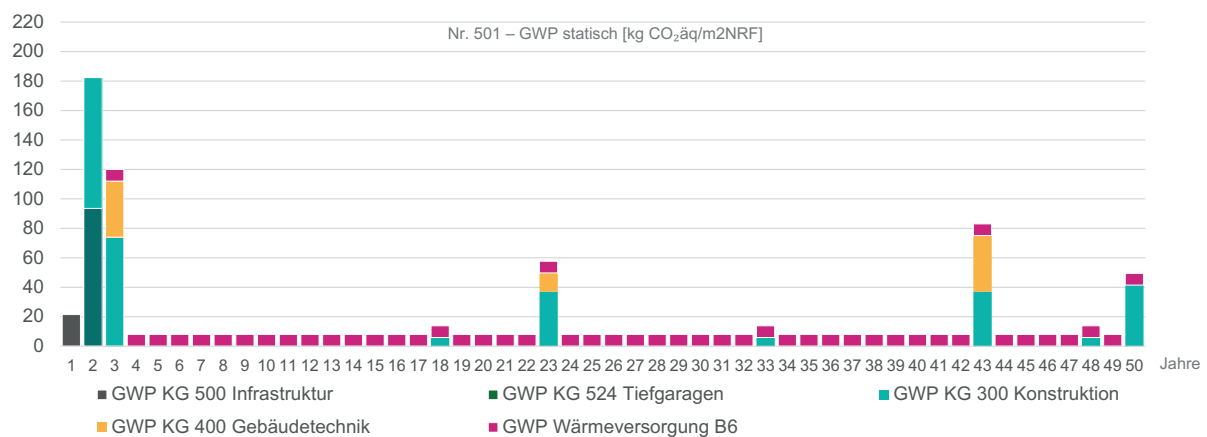
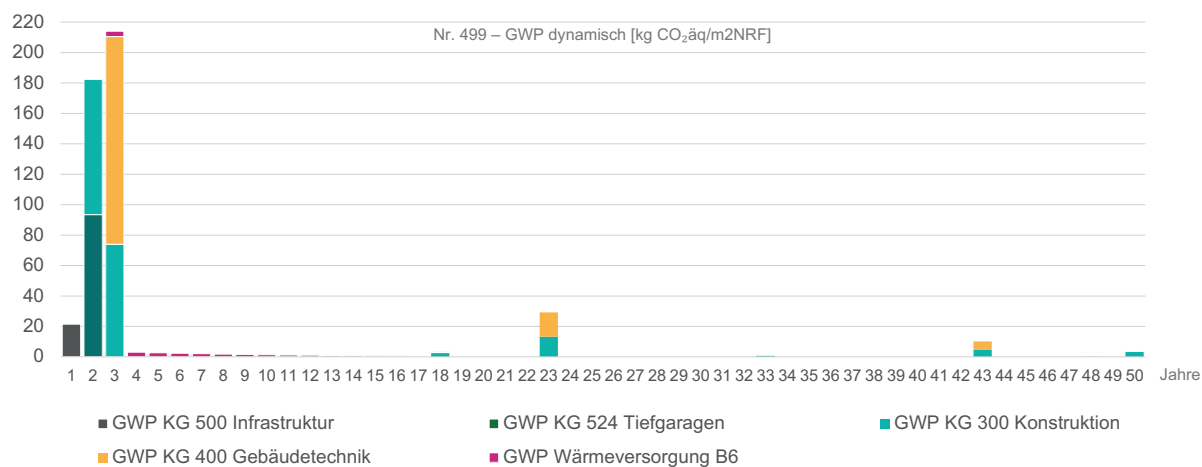
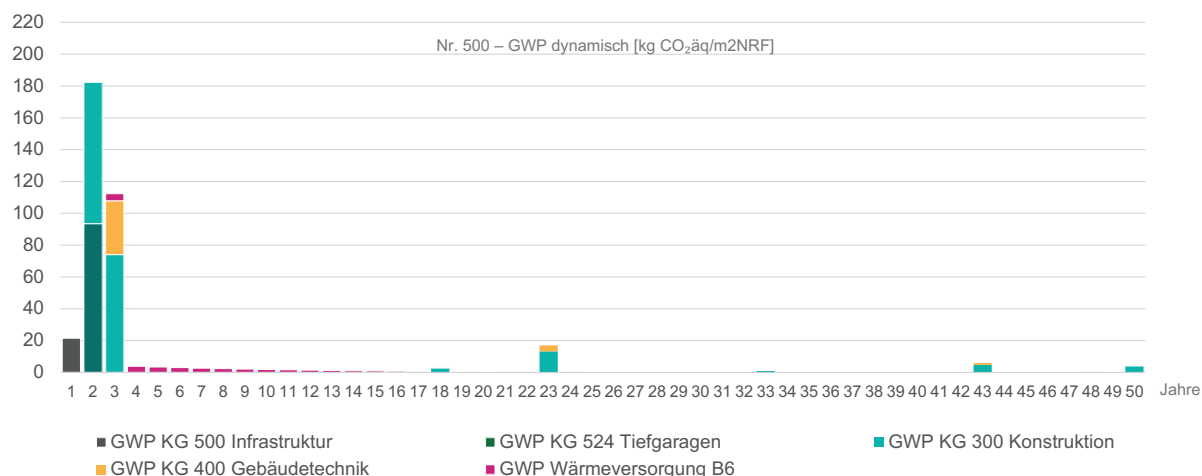


Abbildung 117:

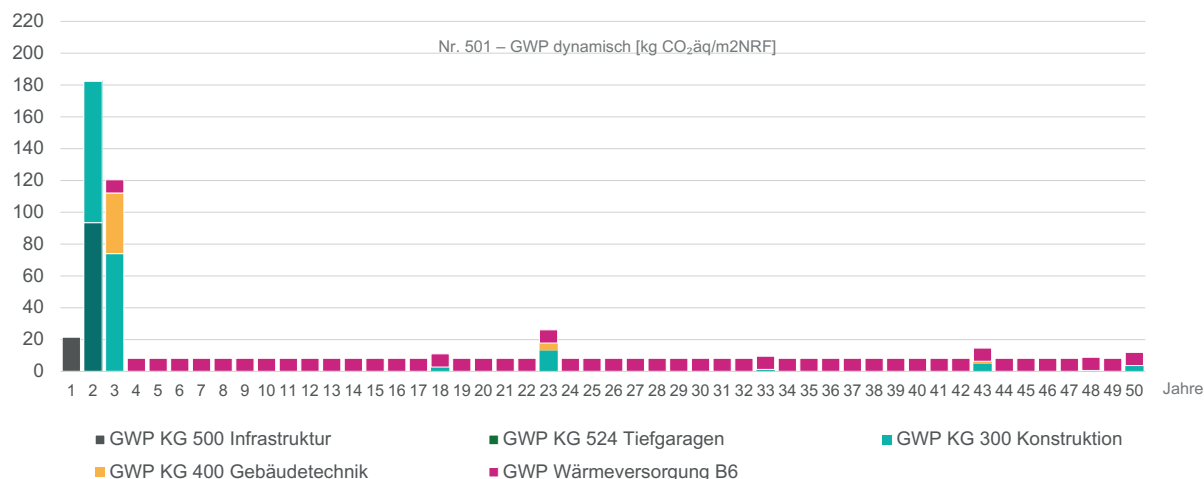
Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP vereinfacht, dynamisch [kg CO₂eq/m² NRF], hier Variante Nr. 499: Kalte Nahwärme

**Abbildung 118:**

Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren vereinfacht, dynamisch GWP [kg CO₂eq/m² NRF], hier Variante Nr. 500: Luft-Wasser-Wärmepumpe

**Abbildung 119:**

Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren vereinfacht, dynamisch GWP [kg CO₂eq/m² NRF], hier Variante Nr. 501: Erdgas



Die statische Betrachtung verdeutlicht zunächst, dass die Erdgas-Variante (Nr. 501) erwartungsgemäß die höchsten Emissionen verursacht, vor allem bedingt durch den Betrieb der Wärmeversorgung. Im Gegensatz dazu weisen die strombasierten Varianten Kalte Nahwärme (Nr. 499) und Luft-Wasser-Wärmepumpe (Nr. 500) bereits bei der statischen Bewertung deutlich geringere Betriebsemissionen auf. Die anfängliche Errichtung, insbesondere in den Bereichen Konstruktion, Tiefgaragen und Gebäudetechnik, stellt bei allen untersuchten Varianten einen substantziellen Anteil der Gesamtlebenszyklusemissionen dar.

Die vereinfachte, dynamische Ergänzung zeigt deutlich stärkere Unterschiede zwischen fossilen und erneuerbaren Versorgungsarten auf. Durch die dynamische Betrachtung erhöht sich die Differenz zwischen der Erdgas-Variante und den strombasierten Alternativen erheblich (Abbildung 120 und 121).

Abbildung 120:

Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen GWP statisch [kg CO₂ eq/m² NRF].

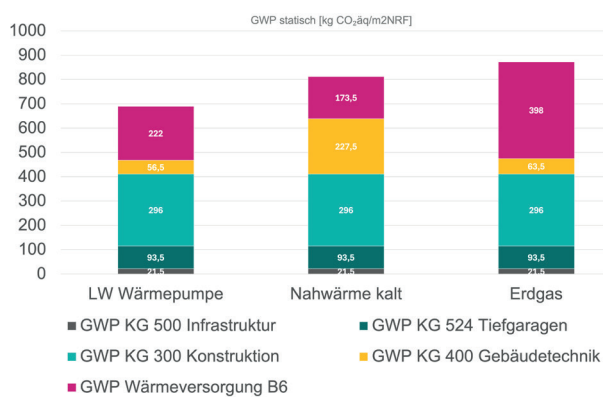
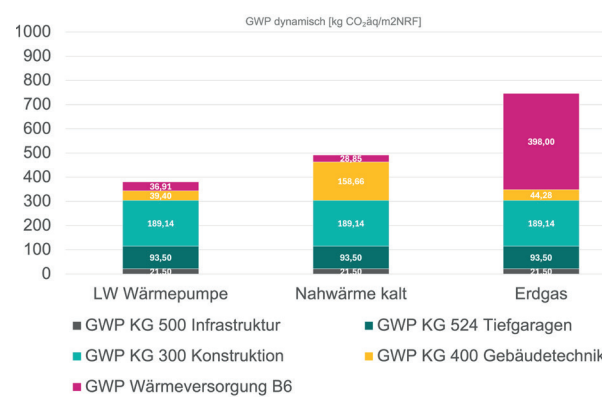


Abbildung 121:

Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen GWP vereinfacht dynamisch [kg CO₂ eq/m² NRF].



Insbesondere profitieren strombasierte Systeme langfristig deutlich von der fortschreitenden Dekarbonisierung des Energiesystems, wodurch deren Emissionen zukünftig weiter reduziert werden. Ebenso verringern sich langfristig auch die grauen Emissionen beim Austausch von Bauteilen und technischen Komponenten, da sich die durch Austausch bedingten Herstellungsemissionen langfristig verringern. Diese Ergebnisse zeigen auf, dass eine rein statische Betrachtung langfristige Effekte nicht ausreichend realistisch abbilden kann. Des Weiteren gibt es zahlreiche weitere, sich verändernde dynamische Parameter, die aktuell statisch nicht abgebildet werden können. So stellt die zunehmende Singularisierung der Gesellschaft etwa einen weiteren wichtigen dynamischen Parameter dar. Diese führt zu einer geringeren Belegungsdichte und einem steigenden Pro-Kopf-Verbrauch, der zukünftig ebenfalls dynamisch berücksichtigt werden sollte. Dies spricht für eine Darlegung des Verbrauchs je Person, statt einer Erhebung je m² NRF.

Die Ergebnisse legen nahe, dass dynamische GWP-Bewertungen zukünftig in der Gebäude- und Quartiers-LCA verwendet werden sollten. Sie ermöglichen realistischere und weniger verzerrte Vergleiche zwischen unterschiedlichen Energieversorgungsvarianten, insbesondere von fossilen gegenüber erneuerbaren Wärmeversorgungssystemen. Bei der Materialwahl sollte langfristig auch berücksichtigt werden, dass Herstellungsemissionen durch den fortschreitenden Ausbau erneuerbarer Energien sinken werden. Dennoch bleibt die Reduzierung der anfänglichen Emissionen der Herstellung und Errichtung ein wesentliches Ziel, da diese Emissionen unmittelbar wirken. Dynamische Ansätze sollten deshalb perspektivisch in bestehende Bewertungssysteme, wie beispielsweise das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG), integriert werden. Zudem sollten standardisierte dynamische LCA-Modelle weiterentwickelt und in nationale Bewertungsinstrumente übernommen werden, um fundierte und nachhaltige Entscheidungsgrundlagen bereitzustellen.

8. Exemplarische Bilanzierung einer realen Siedlung

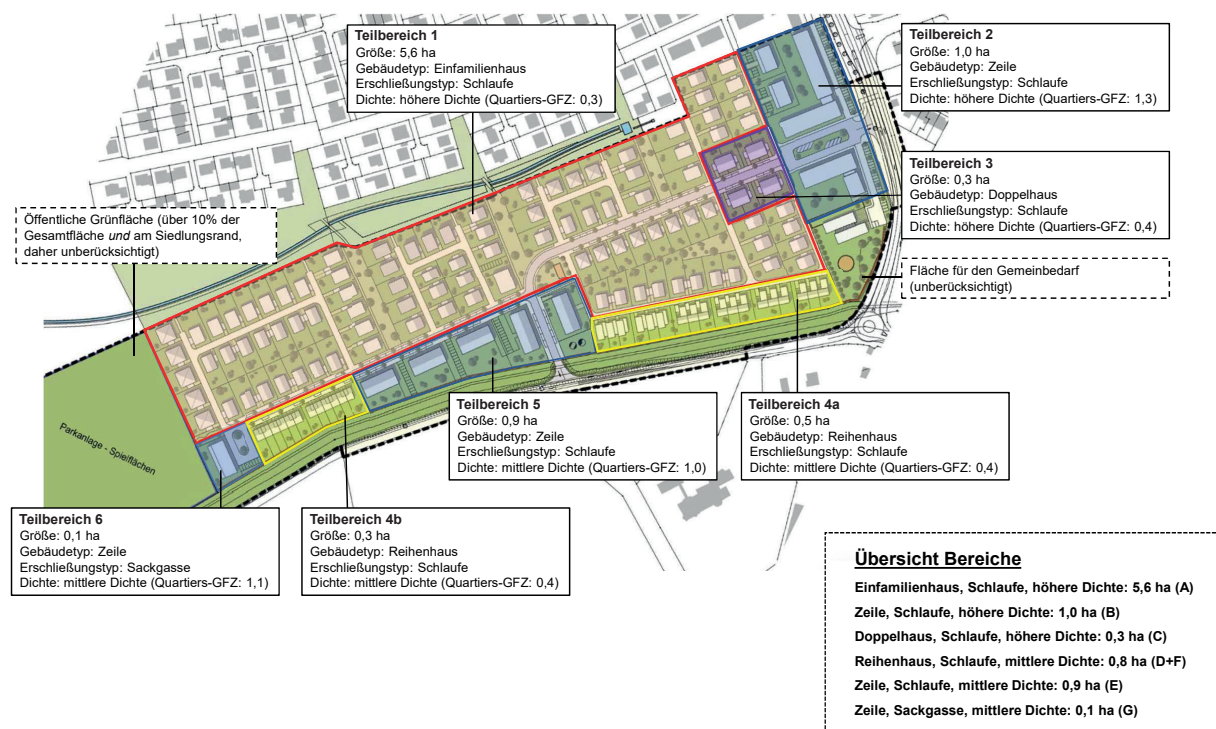
Zur Darstellung der Anwendbarkeit des Q-LCA-Tools wird im Folgenden eine Fallstudie modelliert. Als Grundlage dient der Rahmenplan für das Wohngebiet "Eichholz" in Wesseling-Keldenich (Nordrhein-Westfalen), welcher in Abbildung 122 dargestellt ist. Um eine solche Realsiedlung mit dem Q-LCA-Tool abzubilden, müssen zunächst in sich einheitliche Siedlungsbereiche identifiziert und deren Flächengrößen erfasst werden. Einheitliche Siedlungsbereiche bestehen vorliegend aus Bereichen mit

- einheitlichen Gebäudetypen,
- einer einheitlichen Erschließung,
- einer einheitlichen Bauweise,
- einem einheitlichen Energiekennwert,
- einer einheitlichen Wärmeversorgung sowie
- einer gleichbleibenden Dichte.

Bei einer hohen Homogenität kann die Siedlung auch aus nur einem Teilbereich bestehen. Derzeit steht im Q-LCA-Tool eine maximale Anzahl von sechs Teilbereichen zur Verfügung.

Abbildung 122:

Lageplan der untersuchten Realsiedlung mit sechs unterscheidbaren Teilbereichen



Stehen die Teilbereiche fest, kann für jeden Bereich neben der Fläche die jeweilige Kombination der sechs Parameter (Gebäudetyp, Bauweise, Energiekennwert, Art der Wärmeversorgung, Dichte und Erschließungstyp) in der Eingabemaske des Tools eingegeben werden (Tabelle 12). In der Ausgabemaske des Tools werden dann die Ergebnisse der Teilbereiche sowie die der gesamten Siedlung als CO₂-Äquivalente pro Jahr dargestellt.

In der Fallstudie können sechs unterscheidbare Teilbereiche identifiziert werden, wobei Teilbereich 4a und 4b aufgrund derselben Parameter-Kombination gemeinsam betrachtet und ihre Flächen summiert werden. Falls bestimmte Parameterinformationen im Planungsprozess noch offen sind, ist es im Sinne der Vergleichbarkeit hilfreich, gleiche Annahmen für alle Siedlungsbereiche anzunehmen, wie im dargestellten Beispiel für die Bauweise (hier Holzbauweise), Energiekennwert (hier 30kWh) und die Wärmeversorgung (hier Luft-Wasser Wärmepumpe). Zusätzlich kann in dem Tool entschieden werden, ob der Haushaltsstrom mit berechnet werden soll oder nicht.

Tabelle 12:

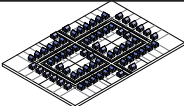
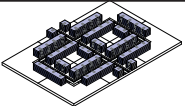
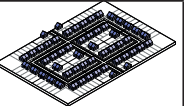
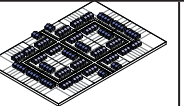
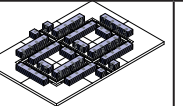
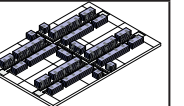
Festlegung der Flächen und Parameter von den sechs Siedlungsbereichen in der Eingabemaske des Q-LCA Tools

Kennwert	Siedlungsbereich 1	Siedlungsbereich 2	Siedlungsbereich 3	Siedlungsbereich 4	Siedlungsbereich 5	Siedlungsbereich 6
Nutzungsdauer	50 Jahre					
Fläche (ha)	5,6	1	0,3	0,8	0,9	0,1
Gebäudetyp	Einfamilienhaus (EFH)	Zeilenhaus (ZH)	Doppelhaus (DH)	Reihenhaus (RH)	Reihenhaus (RH)	Zeilenhaus (ZH)
Bauweise	Holzbauweise	Holzbauweise	Holzbauweise	Holzbauweise	Holzbauweise	Holzbauweise
Energiebedarf	30 kWh	30 kWh	30 kWh	30 kWh	30 kWh	30 kWh
Versorgungsart	LW Wärmepumpe	LW Wärmepumpe	LW Wärmepumpe	LW Wärmepumpe	LW Wärmepumpe	LW Wärmepumpe
Dichte	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel	Mittel
Erschließungstyp	Schlaufe	Schlaufe	Schlaufe	Schlaufe	Schlaufe	Sackgasse
inkl. Haushaltsstrom	Nein					

Zur Veranschaulichung der modellierten Siedlung stellt das Q-LCA-Tool in der Eingabemaske außerdem dar, welche Siedlungsbereiche welchen Anteil an der Gesamtfläche der Siedlung einnehmen und wie diese Siedlungsbereiche in etwa modelliert aussehen (Tabelle 13). Nach Eingabe der Parameter können der Eingabemaske die berechneten Ergebnisse entnommen werden. Diese sind in fünf Teilergebnisse und einem Gesamtergebnis untergliedert:

Tabelle 13:

Darstellung der Teilbereiche im Q-LCA Tool

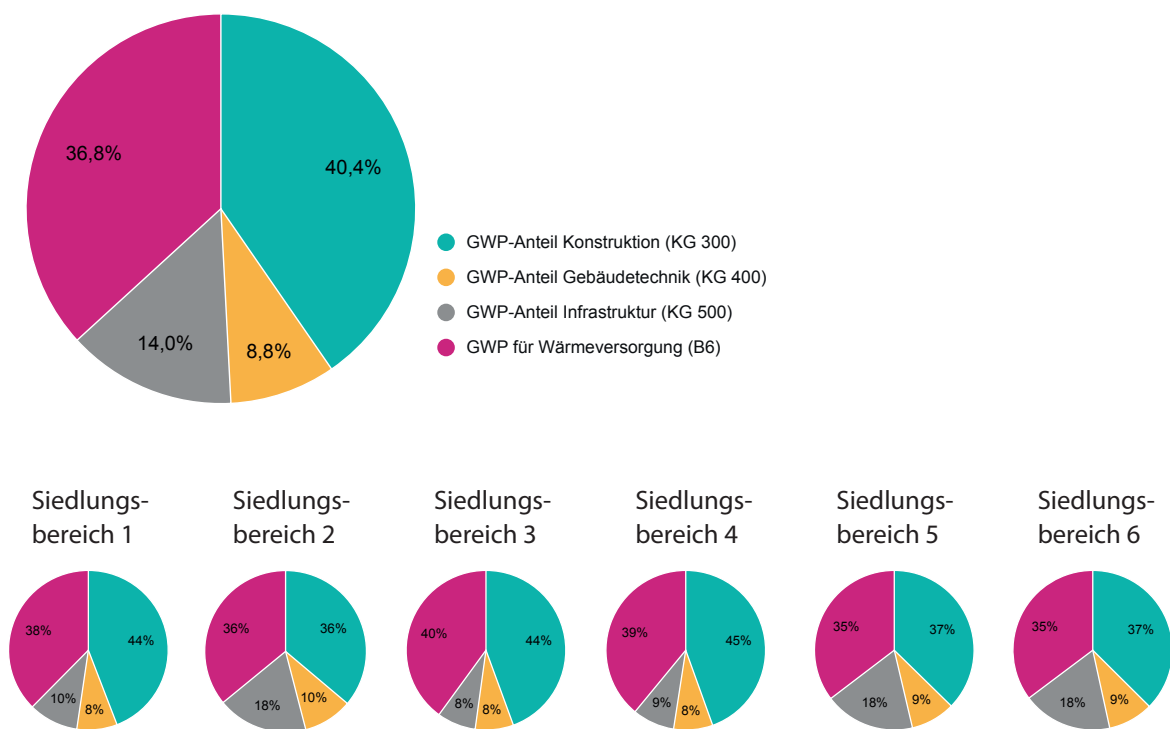
Siedlungs- bereich 1	Siedlungs- bereich 2	Siedlungs- bereich 3	Siedlungs- bereich 4	Siedlungs- bereich 5	Siedlungs- bereich 6
EFH, hohe Dichte, Schlaufe	ZH, hohe Dichte, Schlaufe	DH, hohe Dichte, Schlaufe	RH, mittlere Dichte, Schlaufe	ZH, mittlere Dichte, Schlaufe	ZH, mittlere Dichte, Sackgasse
64 %	11 %	39 %	9 %	10 %	1 %
					

GWP nach Kostengruppen

Das erste Teilergebnis befasst sich mit den unterschiedlichen Kostengruppen und welchen Anteil sie am absoluten GWP einnehmen. An dieser Analyse kann vorliegend beispielsweise abgelesen werden, dass die Gebäudekonstruktion (KG 300) bei der gesamten Siedlung mit rund 40 % den größten Anteil einnimmt, gefolgt von der Wärmeversorgung mit circa 35 % und der Infrastruktur einschließlich der Stellplätze mit etwa 17 %. Der Haustechnik fällt mit nur knapp 9 % eine kleinere Rolle zu. Des Weiteren kann durch das Tool die Zusammensetzung des GWP nach den Kostengruppen der sechs Teilbereiche getrennt voneinander visualisiert und überprüft werden (Abbildung 123).

Abbildung 123:

Anteile des GWP differenziert nach Kostengruppen am absoluten GWP der Siedlung (oben), sowie jeweils für die sechs vorab definierten Teilbereiche (unten) (ohne Haushaltsstrom)



Ergebnisdarstellung: GWP absolut und GWP mit flächen- und personenbezogenen Kennwerten

Die Ergebnisse der Teilbereiche werden hinsichtlich der erzeugten Treibhausgasemissionen jeweils in absoluten Werten (Abbildung 124), pro Quadratmeter NRF (Abbildung 125) sowie pro Person (Abbildung 126) ausgewiesen. Dieses macht die Effizienz der jeweiligen Teilbereiche sichtbar und gibt Planenden die Möglichkeit, Optimierungspotenziale für die Siedlung zu identifizieren und zu testen. Das absolute GWP der Teilbereiche steht in erster Linie in Abhängigkeit zur Größe der jeweiligen Bereiche, die flächen- und personenbezogenen Kennwerte erlauben ein Benchmarking zu Planungsvarianten oder anderen Siedlungsprojekten.

Abbildung 124:

Absoluter GWP der sechs Siedlungsbereiche (ohne Haushaltsstrom) in [kg CO₂ eq/ m² * a]

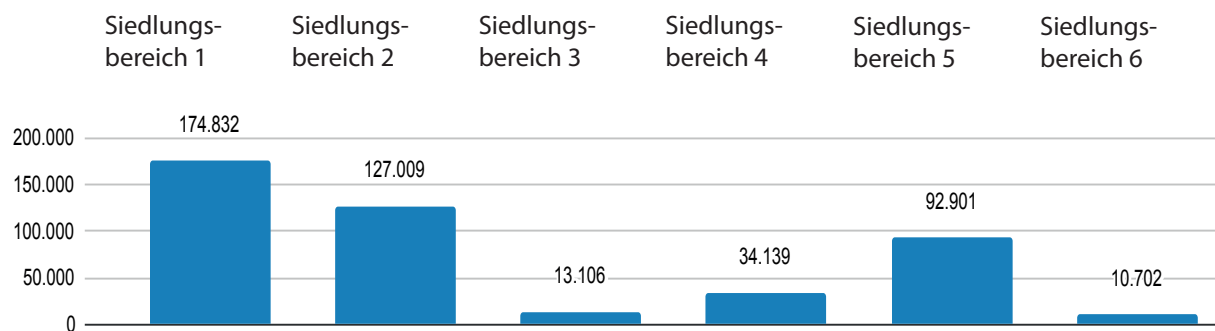


Abbildung 125:

NRF-flächenbezogener GWP der sechs Siedlungsbereiche (ohne Haushaltsstrom) in [kg CO₂ eq/ m² NRF * a]

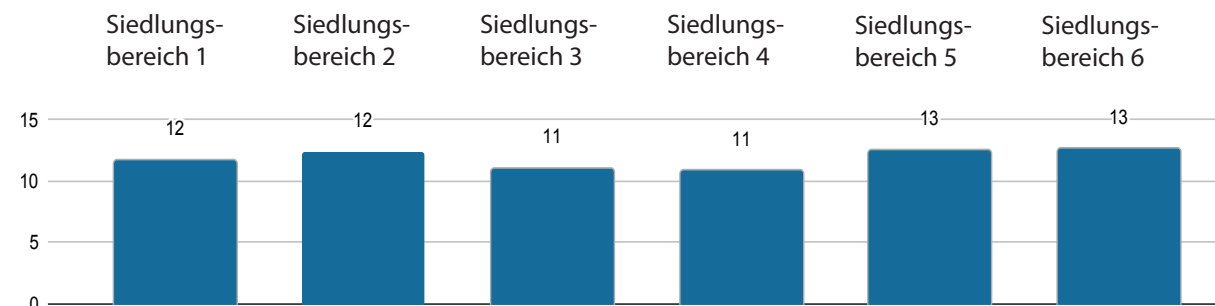
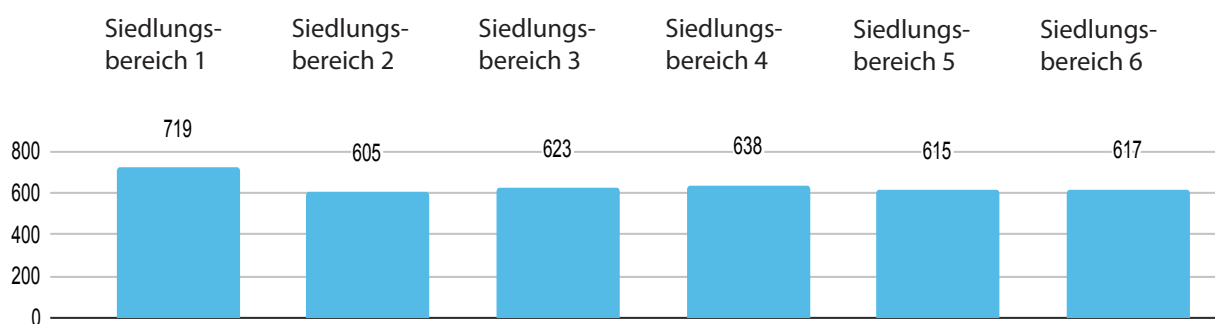


Abbildung 126:

Personenbezogenes GWP der sechs Siedlungsbereiche (ohne Haushaltsstrom) in [kg CO₂ eq/ Person * a]



Gesamtergebnis der realen Siedlung

Insgesamt verursacht die untersuchte Siedlung über die betrachtete Lebensdauer von 50 Jahren ca. 22.635 Tonnen CO₂-Äquivalente, das ergibt jährlich 453 Tonnen CO₂-Äquivalente unter der Annahme von statisch gesetzten Bedingungen des heutigen Energiesystems für Herstellung und Betrieb. Unter Berücksichtigung aller möglichen Parameterkombinationen dieser Siedlung ergibt sich ein Verbesserungspotenzial von 14.883 Tonnen CO₂-Äquivalenten: die bestmögliche Siedlung hätte einen GWP-Wert von lediglich 7.751 Tonnen CO₂-Äquivalenten. Die Siedlung mit dem Maximalwert läge bei 209.647 Tonnen CO₂-Äquivalenten. Dies bedeutet, dass sich die eingegebene Real-Siedlung im unteren Zehntel der möglichen GWP-Werte befindet. Wichtig ist in diesem Kontext zu berücksichtigen, dass die angenommenen Parameter 'Bauweise' - es wurde Holzbauweise angenommen - und 'Energiekennwert' - es wurden 30 kWh angenommen - hier einen großen positiven Einfluss haben dürften. Ausgehend von dieser ersten Analyse kann weiter untersucht werden, welche Einsparpotenziale bestehen. Hier können unterschiedliche Maßnahmen getroffen werden, je nachdem ob absolute, flächen- oder personenbezogene Verbesserungen angestrebt werden.

9. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse des Forschungsprojektes entlang der eingangs formulierten Forschungsfragen beschrieben (vergl. Kapitel 3.2).

(1) Städtebauliche Strukturmerkmale aktueller Siedlungsentwicklungen

Der aktuelle Siedlungsbau in Deutschland weist eine große Vielfalt in Bezug auf Lage, Größe, Gebäudetypen, Freiraumangebot und anderer Merkmale auf. Nach eingehender Analyse lässt sich diese Vielfalt aber durch relativ wenige städte- und hochbauliche Merkmale beschreiben, die in den untersuchten Siedlungen in unterschiedlicher Weise kombiniert und ausgeprägt sind. Die empirische Erhebung und Analyse von 104 Neubausiedlungen, die zwischen 2010 und 2020 in Deutschland realisiert wurden, zeigt große Abhängigkeiten zwischen der Lage der Siedlungen und ihren Strukturmerkmalen mit einer deutlichen Präferenz für kompakte Bauformen mittlerer Dichte. Die typischen Geschossflächenzahlen (Siedlungs-GFZ) liegen zwischen 0,8 und 1,2, was einer mittleren Dichte entspricht, und eine effiziente Flächennutzung bei gleichzeitig hoher Aufenthalts- und Freiraumqualität ermöglicht.

Etwa drei Viertel der untersuchten Projekte sind als Innenentwicklungen einzuordnen, häufig auf ehemaligen Gewerbe-, Militär- oder Konversionsflächen. Hier wurden vor allem Punkt-, Zeilen- und Blockrandbebauungen mittlerer Dichte mit einer Schlaufenerschließung geplant, in Großstädten am häufigsten als Blockrandbebauungen. Einfamilien- und Doppelhaussiedlungen wurden dort kaum realisiert (unter 3 % der analysierten Projekte). Außenentwicklungen auf bisher unbebauten Flächen nehmen zwar weiterhin einen beachtlichen Anteil ein, werden im Hinblick auf Flächenverbrauch und Infrastrukturfolgekosten jedoch zunehmend kritisch betrachtet. Hier wurden am häufigsten Einfamilien- und Doppelhaussiedlungen geringer Dichte mit einer Schlaufenerschließung realisiert. Gleichzeitig war dies auch der am häufigsten geplante Siedlungstyp in Klein- und Mittelstädten.

Als Gebäudetypen/ Bebauungstypen dominieren Reihenhäuser, Zeilenbauten, Punkthäuser und Blockrandstrukturen, während Einfamilienhäuser zwar weiterhin präsent, jedoch vor allem auf periphere Standorte beschränkt sind. Die Siedlungerschließung erfolgt überwiegend über netz- oder schleifenförmige Strukturen, Sackgassen haben eine untergeordnete Bedeutung.

(2) Einfluss der Siedlungsstruktur auf das Treibhausgaspotenzial im Verhältnis zu anderen Planungsentscheidungen

Die Quantifizierung der Umweltauswirkungen auf Grundlage von 972 modellierten Siedlungsvarianten zeigt, dass insbesondere die bauliche Dichte und der Gebäudetyp einen signifikanten Einfluss auf das Gesamt-GWP einer Siedlung haben. Mit zunehmender Dichte sinkt das spezifische Treibhausgaspotenzial sowohl pro Quadratmeter Nutzfläche als auch pro Person. Bei Einfamilienhaussiedlungen kann eine Erhöhung der Dichte – beispielsweise durch kleinere Grundstücke, geringere Abstände und eine dichtere Erschließung – das Gesamt-GWP um bis zu 15 % reduzieren. In stärker verdichteten Siedlungstypen, etwa Reihenhäuser- oder Blockrandstrukturen, können die Einsparungen gegenüber locker bebauten Einfamilienhausgebieten sogar 25 bis 30% betragen. Diese Reduktionen sind vor allem auf eine effizientere Nutzung der baulichen und technischen Infrastruktur sowie auf ein günstigeres Verhältnis von Gebäudehülle zu Volumen zurückzuführen.

Die Art des Erschließungstyps – ob als Gitter-, Schleifen- oder Sackgassenerschließung – zeigt nur marginale Unterschiede in Bezug auf das Gesamt-GWP. Je nach Konstellation der anderen betrachteten Einflussfaktoren liegt ihr Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen einer Siedlung über ihren Lebenszyklus im Mittel bei

maximal ca. 5 %. Entscheidend ist weniger die Form der Erschließung als vielmehr das Verhältnis von Erschließungsfläche zu nutzbarer Gebäudefläche, das bei kompakteren Quartieren deutlich günstiger ausfällt. Diese Unterschiede gewinnen insbesondere bei kleineren Gebäudetypen an Bedeutung, da hier der infrastrukturelle Anteil an den Gesamtemissionen stärker ins Gewicht fällt.

Die Infrastruktur selbst trägt – je nach städtebaulicher Dichte – zwischen 10 und 20 % zum Gesamt-GWP bei. Insbesondere der Bau von Tiefgaragen stellt einen relevanten Einflussfaktor dar. Tiefgaragen erhöhen das Gesamt-GWP je nach Gebäudetyp und Ausführungsart um etwa 2 kg CO₂ eq/m² Nutzfläche und Jahr, was rund 10 bis 13 % des Siedlungs-GWP entspricht. Allein ein Verzicht auf Tiefgaragen kann eine Reduktion um bis zu 10 % am Gesamt-GWP bewirken. Einen relevanten Anteil an den ökologischen Auswirkungen haben Straßen und Kanalisation bei Siedlungen mit geringerer Dichte. Die Treibhausgaspotenziale, die der Erschließung eines Einfamilienhausgebietes pro Person und Jahr zuzuordnen sind, liegen im Schnitt bei rund 108 kg CO₂ eq/Person a, was einen Anteil von 10 % an der Gesamtemission ausmacht, während sie sich bei einer Blockrandbebauung im Schnitt auf nur 10 kg CO₂ eq/Person und Jahr belaufen (1,4 % des Gesamt-GWP). Die Effizienz der Erschließung ist für das Gesamt-GWP hingegen nur bei Siedlungen geringer Dichte (vor allem Einfamilien-, Doppel- und Reihenhaussiedlungen), also den Siedlungstypen, die in der Praxis in erster Linie in Außenbereichen und Klein- und Mittelstädten geplant werden, relevant.

Im Vergleich zu den städtebaulichen Strukturmerkmalen erweisen sich die energetischen und technischen Entscheidungen als deutlich einflussreicher. Besonders stark wirkt sich der Energiekennwert der Gebäude auf die Gesamtbilanz aus. Zwischen einem sehr energieeffizienten Gebäude (15 kWh/m²a) und einem konventionellen Neubau (70 kWh/m²a) kann die Differenz im GWP bis zu 35 bis 40 % betragen. Den größten Hebel innerhalb der untersuchten Parameter bietet die Wahl der Wärmeversorgungsart und des damit verbundenen Energieträgers. Während fossil betriebene Systeme (hier untersucht: Erdgasheizungen) zu den höchsten Emissionswerten führen, ermöglichen strombasierte, erneuerbare Systeme wie Luft-Wasser-Wärmepumpen oder kalte Nahwärmenetze deutlich niedrigere GWP-Werte. Die Unterschiede können über den Lebenszyklus einer Siedlung bis zu 40 % betragen. Bei einer dynamischen Betrachtung, welche eine Dekarbonisierung des Strommixes bis 2045 berücksichtigt, nimmt die Bedeutung des Energieträgers für die langfristige Emissionsbilanz weiter zu, da sich der relative Vorteil strombasierter Systeme mit fortschreitender Dekarbonisierung verstärkt.

Die Standortwahl einer Siedlung beeinflusst das GWP indirekt über den Energieverbrauch für Mobilität und die Länge der technischen Erschließungssysteme. Außenentwicklungen auf bislang unbebauten Flächen sind mit einem höheren Infrastrukturaufwand und größeren Materialmengen verbunden, während Innenentwicklungen in bereits erschlossenen Lagen durch eine effizientere Nutzung bestehender Netze und Flächen geringere Emissionen verursachen. Frühere Studien zeigen, dass eine dezentrale, flächenintensive Siedlungsweise bis zu viermal höhere Infrastrukturkosten und entsprechende Materialaufwendungen nach sich zieht als eine kompakte, innenstadtnahe Entwicklung. Die Effizienzsteigerung der Nutzung innerstädtischer Infrastrukturnetze infolge einer baulichen Nachverdichtung wurde im Rahmen dieser Studie aber nicht näher untersucht.

Insgesamt zeigt sich, dass die Siedlungsstruktur zwar nicht der stärkste Einflussfaktor auf das GWP ist, jedoch als integraler Rahmenfaktor alle anderen Entscheidungen mitbestimmt. Sie legt fest, welche Energiekonzepte technisch und wirtschaftlich überhaupt umsetzbar sind, wie der ruhende Verkehr organisiert und in welchem Umfang Infrastruktur bereitgestellt werden muss. Ihre strategische Bedeutung liegt somit weniger in der kurzfristigen Emissionsreduktion als in ihrer langfristigen Steuerungswirkung für die Ressourceneffizienz ganzer Quartiere.

(3) Anteile der Teilsysteme Gebäude, Infrastruktur und Betriebsenergie an der GWP-Gesamtbilanz einer Siedlung

Von dem durchschnittlichen Gesamt-GWP aller Siedlungsvarianten entfallen rund 50 % auf die Gebäude (KG 300–400), 30 bis 35 % auf den Gebäudebetrieb (Wärmeversorgung, B6), 10 bis 15 % auf die Infrastruktur (KG

500) sowie ca. 5 % auf die Energieversorgungssysteme (KG 420). Die relative Gewichtung dieser Anteile variiert jedoch deutlich in Abhängigkeit von Dichte, Gebäudetyp, energetischem Standard und Versorgungsart. Mit steigendem Energiestandard sinkt der Anteil der Betriebsenergie deutlich, während die relativen Anteile von Bau- und Infrastrukturprozessen zunehmen. Bei einem sehr hohen Energiestandard von 15 kWh/m²a sinkt der Anteil der Betriebsenergie auf etwa ein Viertel des Gesamt-GWP, während die Anteile der Gebäude und Infrastrukturen zusammen mehr als 70 % ausmachen. Bei mittlerem Standard (30 kWh/m²a) ergibt sich ein Verhältnis von etwa 60% Herstellungsemissionen zu 40 % Betriebsenergie. Bei geringem Energiestandard (70 kWh/m²a) übersteigen die Nutzungs- und Betriebsemissionen die Herstellungsanteile deutlich und machen in diesen Fällen über die Hälfte der Gesamtbilanz aus. Die energetische Qualität der Gebäude entscheidet somit maßgeblich über die langfristige Emissionsbelastung, vor allem bei einer fossilen Energieversorgung. Während die Bau- und Infrastrukturanteile zum Zeitpunkt der Errichtung fix sind, summieren sich die Betriebsemissionen über den Lebenszyklus und bestimmen insbesondere bei geringen Effizienzstandards die Gesamthöhe des GWP.

Neben dem energetischen Standard hat die Wahl des Wärmeversorgungssystems also einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtbilanz. Im Modell wurden Luft-Wasser-Wärmepumpen, kalte Nahwärmenetze und Erdgasheizungen verglichen. Über alle Siedlungstypen hinweg weisen strombasierte Systeme – insbesondere Luft-Wasser-Wärmepumpen – die geringsten GWP-Werte auf. Bei mittleren bis hohen Energiestandards verursachen sie spezifische Emissionen von lediglich 2 bis 4 kg CO₂ eq/m²a und liegen damit rund 30 bis 40 % unter den Werten von fossilen Systemen. Kalte Nahwärmenetze zeigen in der Gesamtbilanz ebenfalls günstige Ergebnisse, obwohl die initialen Herstellungsemissionen aufgrund der aufwendigeren Infrastruktur höher sind. Bei hoher Bebauungsdichte können sie ihre Vorteile in der Betriebsphase jedoch vollständig ausgleichen. Mit fossilem Erdgas betriebene Systeme weisen dagegen über den Lebenszyklus die höchsten GWP-Werte auf und liegen um 35 bis 45 % höher als Wärmepumpensysteme – ausgenommen bei sehr energieeffizienten Gebäuden. Die Energieversorgung stellt damit den wirksamsten Einzelparameter für die Reduktion des Gesamt-GWP dar.

Die Wahl der Konstruktionsweise beeinflusst vor allem die Herstellungsemissionen in den Kostengruppen 300 (und 500). Der Einfluss der Konstruktionsweise liegt im Mittel relativ konstant bei 6,5 % zugunsten der Holzbauweise. Das GWP für Holzbaukonstruktionen ist durchschnittlich etwa 1,5 bis 2 kg CO₂ eq/m²a niedriger als das GWP von mineralischen Bauweisen.

Von signifikanter Wirkung ist – wie bereits beschrieben – die bauliche Dichte, die in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Faktor Gebäudetyp steht. Sie zeigt sich insbesondere bei der Betrachtung der Treibhausgasemissionen pro Flächeneinheit. Die weit verbreitete Annahme, dass die Umweltauswirkungen einer Siedlung linear mit ihrer baulichen Dichte abnehmen, konnte jedoch nicht bestätigt werden. Zwar können durch eine höhere Dichte die verwendeten Ressourcen und baulichen Strukturen einer Siedlung effizienter genutzt werden, aber es müssen auch gegenläufige Faktoren berücksichtigt werden. Zu nennen ist beispielsweise die bauordnungsrechtlich geforderten Abstandsflächen und deren restriktive Wirkung auf die Dichte einer Siedlung. So wird bei einer Punkthausbebauung die maximale GFZ bei Einhaltung der Abstandsflächen von 0,4 H in der Regel bereits nach 6 Geschossen erreicht und damit auch die beste Wirkung in Bezug auf den Ressourcenverbrauch und die Treibhausgaspotenziale.

Zwischen den untersuchten Siedlungstypen – Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhause, Zeilen-, Punkt- und Blockrandbebauung – zeigen sich deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung der Emissionsanteile. In Einfamilienhaussiedlungen dominiert der Anteil der Gebäudekonstruktion und Infrastruktur, die gemeinsam bis zu 70 % des Gesamt-GWP ausmachen. Dies resultiert aus dem hohen Flächenverbrauch, der geringen Belegungsdichte und dem größeren Infrastrukturbedarf pro Wohneinheit. In Reihen- und Zeilenhausquartieren reduziert sich der Anteil der Infrastruktur auf unter 15 %, während die Gebäudeanteile infolge der geteilten Bauteile und der höheren Dichte deutlich geringer ausfallen. In kompakten, mehrgeschossigen Blockrandquartieren verschiebt sich die Bilanz zugunsten der Betriebsemissionen. Hier liegen die Anteile der grauen

Energie bei etwa 50%, die Betriebsenergie bei rund 40% und die Infrastruktur bei weniger als 10 %. Diese Werte verdeutlichen, dass dichte, mehrgeschossige Siedlungen pro Person und Wohneinheit eine wesentlich bessere ökologische Gesamtbilanz aufweisen als flächenintensive Bauformen mit geringer baulicher Dichte.

Neben Energiekennwert und Energieversorgung spielt auch die Belegungsdichte, also die Zahl der Personen pro Wohneinheit, eine zentrale Rolle. Da kleinere Gebäudetypen in der Regel größere Wohnflächen pro Person aufweisen, resultieren hieraus höhere GWP-Werte. Eine Reduktion der durchschnittlichen Wohnfläche um 10 m² pro Person kann die Treibhausgasemissionen einer Siedlung um etwa ein Viertel verringern. Suffizienzorientierte Strategien, wie kleinere Wohnungseinheiten oder gemeinschaftliche Wohnformen, können einen erheblichen Einfluss auf die Klimabilanz haben. Die Erhöhung der Belegungsdichte stellt damit einen großen und zugleich kostengünstigen Hebel zur Verringerung des GWP im Siedlungsbau dar.

(4) Einfluss der Systemgrenzen und Vorannahmen auf die Bilanzierungsergebnisse

Die Festlegung geeigneter Systemgrenzen ist entscheidend für die Vergleichbarkeit und Aussagekraft von Ökobilanzen. Im Projekt Q-LCA wurden sowohl räumliche als auch zeitliche Grenzen definiert, um die ökologischen Wirkungen auf Quartiersebene vollständig zu erfassen. In welchem Maße die gewählten Systemgrenzen und Vorannahmen die Ergebnisse prägen, zeigen mehrere Sensitivitäten des Modells:

a) Die Wahl der funktionalen Einheit beeinflusst die Interpretation. Je nachdem ob der flächenbezogene (kg CO₂ eq/m² NRF*a) und der personenbezogene (kg CO₂ eq/Person*a) Indikator bilanziert wird verschiebt sich die „Vorteilhaftigkeit“ von Siedlungsformen. Höhere Belegungsdichten in großen Gebäudetypen verbessern überproportional die Ergebnisse des Personen-Indikators, während beim Flächenindikator Reihen- und Zeilenstrukturen häufig am günstigsten liegen.

b) Die Einbeziehung der Infrastruktur ist nicht nur methodisch konsistent, sondern auch ergebnisrelevant. Im Mittel trägt die Siedlungsinfrastruktur (KG 500) rund 11,5 % zum GWP bei, mit deutlichen Schwankungen in Abhängigkeit von Dichte und Stellplatzsystemen (Tiefgarage versus oberirdische Stellplätze). Ohne die Berücksichtigung dieser Systemelemente blieben sowohl die Infrastrukturaufwendungen für lockere Strukturen (hoher Erschließungsanteil) unterschätzt als auch Vermeidungshebel (z. B. Verzicht auf Tiefgaragen) unsichtbar.

c) Die Einbeziehung des Haushaltsstrom in der Bilanz erhöht das Gesamt-GWP signifikant und wirkt über Haushaltsgrößen und Personendichten unterschiedlich stark auf Siedlungstypen. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung sollte der Haushaltsstrom daher als Szenario ergänzt werden, insbesondere für sozialräumliche Vergleiche.

d) Die Wahl zwischen statischer und dynamischer Zeitbewertung verändert die Rangfolge von Versorgungssystemen. In der statischen 50-Jahre-Sicht liegen die Gasvarianten erwartbar am höchsten, während strombasierte Systeme (Luft-Wasser-Wärmepumpe, kalte Nahwärme) deutlich günstiger abschneiden. Die dynamisierte Sicht vergrößert diesen Abstand, weil die Betriebsemissionen strombasierter Systeme im Zeitverlauf überproportional sinken. Bei einer dynamischen Bilanzierung wird die Transformation des Energiesystems adäquat berücksichtigt.

e) Annahmen zur Erneuerungszyklen und Dekarbonisierungspfade der Vorketten beeinflussen das Verhältnis zwischen grauer und Betriebsenergie. Bei einer dynamischen Betrachtung (mit dem im Projekt gewählten 5%-Degressionspfad für Emissionen beim Bauteilersatz) sinken langfristig die Beiträge aus KG 300/400 moderat, während die Hauptdynamik im Energiesystem liegt. Bei einer statischen Betrachtung hingegen (ohne Berücksichtigung von Dekarbonisierungspfaden) sinken die Emissionen für den Bauteilersatz weniger stark, weshalb ihr Anteil am Gesamt-GWP zunimmt.

g) Der verkehrsinduzierte Energiebedarf wurde in Q-LCA zwar nicht untersucht, gleichwohl ist bekannt, dass flächenintensive Außenentwicklungen zusätzliche Verkehrsleistungen induzieren. Für eine ganzheitliche Klimawirkungsbewertung empfiehlt sich daher eine modulare Koppelung mit einem Mobilitätsmodul.

Die gewählten Systemgrenzen und Vorannahmen haben also einen maßgeblichen Einfluss auf die Bilanzierungsergebnisse und deren Interpretation. Eine räumlich erweiterte Quartiersgrenze (inkl. Infrastruktur) und eine dynamisierte 50-Jahre-Zeitgrenze verbessern die Realitätsnähe und die Steuerungsrelevanz der Ergebnisse. Zugleich verlangen sie Transparenz über Annahmen (z. B. Dekarbonisierungspfade, Erneuerungszyklen, Haushaltsstrom) und die konsequente Ausweisung von Sensitivitäten. Für weitere Studien lassen sich hieraus Empfehlungen für geeignete Systemgrenzen ableiten:

- Räumlich sollte die Quartiersbilanz stets KG 300/400, KG 420 und KG 500 enthalten – inklusive Stellplatzsystemen –, weil andernfalls zentrale, durch Siedlungsdichte und Typologie determinierte Effekte (Erschließungslängen, Tiefgaragenbau) systematisch unterschätzt werden.
- Die funktionale Einheit ist dual (m^2 NRF a und Person a) zu führen, um Flächeneffizienz und Belegungsdichte konsistent abzubilden.
- Zeitlich ist ein 50-Jahre-Horizont als Referenz geeignet, sollte aber – wo immer möglich – dynamisiert werden, um Pfadabhängigkeiten des Energiesystems korrekt zu erfassen. Die im Projekt verwendeten Annahmen (12 %/a Dekarbonisierung des Stromsystems, 5 % Degression bei Ersatz) sind als plausible Szenarien zu verstehen und in Sensitivitätsanalysen zu variieren.

(5) Dynamische Bilanzierung sowie zukünftige Relevanz von GWP und grauer Energie

Die exemplarisch durchgeführte dynamische Bilanzierung zeigt, dass eine zeitlich aufgelöste Betrachtung von Energiebedarfen und Treibhausgaspotenzialen wesentlich neue Erkenntnisse über die langfristige ökologische Wirkung von Siedlungsstrukturen und Versorgungssystemen ermöglicht. Während konventionelle, statische Lebenszyklusanalysen alle Emissionen über den gesamten Bilanzzeitraum mit konstanten Emissionsfaktoren bewerten, berücksichtigt eine dynamische Betrachtung die Auswirkungen des Szenarios einer Dekarbonisierung des Energiesystems (Strom) bis 2045. Damit wird die Bilanzierung an das umweltpolitische Ziel einer CO_2 -neutralen Gesellschaft angepasst und die tatsächliche Transformation des Energiesystems in der Bewertung abgebildet.

In der dynamischen Bilanzierung wurde davon ausgegangen, dass sich der CO_2 -Emissionsfaktor des deutschen Strommixes jährlich degressiv um etwa 12 % reduziert, bis im Jahr 2045 eine nahezu klimaneutrale Strombereitstellung erreicht ist. Für vorgelagerte Herstellungsprozesse – etwa die Produktion von Baustoffen und Anlagentechnik – wurde eine moderate Verbesserung von 5 % über den 50-jährigen Bilanzzeitraum angenommen. Diese methodische Annahme führt zu einer zeitlich abgestuften Gewichtung der Emissionen: Während in der statischen Bilanz der gesamte Strombedarf mit dem heutigen, noch fossilen Energiemix bewertet wird, sinken die Betriebsanteile im dynamischen Modell sukzessive, weil der Strom zunehmend emissionsärmer erzeugt wird. Damit verschiebt sich die Zusammensetzung der Gesamtbilanz erheblich, und zwar zugunsten jener Siedlungstypen und Systeme, die auf erneuerbare Energiequellen und strombasierte Wärmeerzeugung setzen. Insbesondere Wärmepumpen und kalte Nahwärmenetze werden dadurch langfristig deutlich günstiger als fossile Systeme. Parallel steigt die Bedeutung der Herstellung der baulichen und infrastrukturellen Systeme, da diese frühzeitig Emissionen verursachen, die sich später nicht mehr kompensieren lassen.

Durch die dynamische Betrachtung verändern sich auch deutlich die Bilanzen der Wärmeversorgungssysteme. Während Wärmepumpen und kalte Nahwärmenetze bereits in statischer Betrachtung geringere Treibhausgasemissionen als gasbasierte Systeme aufweisen, verstärkt sich dieser Vorteil unter Berücksichtigung der Dekarbonisierung über den Lebenszyklus erheblich. Da bei fossilen Gasheizungen die Betriebsemissionen über

50 Jahre nahezu konstant bleiben und bei strombasierten Systemen diese bis 2045 gegen Null sinken werden Entscheidungen für erneuerbare Systeme langfristig überproportional wirksam. Parallel zu dieser Verschiebung der Versorgungsemissionen verändert sich auch das relative Gewicht der Lebenszyklusphasen. Mit dem fortschreitenden Rückgang der Betriebsemissionen treten die Herstellungsphase und der Bauteilersatz – insbesondere die emissionsintensiven Bauprozesse in den Kostengruppen 300 und 400 – stärker in den Vordergrund und die graue Energie wird zum dominanten Bestandteil der Gesamtbilanz. Diese Entwicklung lässt sich in den Berechnungen nachweisen. Während bei einer statischen Betrachtung der modellierten Szenarien im Mittel etwa die Hälfte der gesamten Treibhausgasemissionen auf den Gebäudebetrieb entfällt, steigt in einer dynamischen Betrachtung der Anteil der Herstellung auf bis zu zwei Drittel der Gesamtemissionen an. Der Vergleich zwischen statischer und dynamischer Bilanzierung macht somit deutlich, dass zeitliche Annahmen und Systemgrenzen maßgeblich über die Aussagekraft der Ergebnisse entscheiden. Wird der heutige Strommix über Jahrzehnte konstant fortgeschrieben, führt das zu einer Überschätzung des Gebäudebetriebs und einer Unterschätzung des Hoch- und Tiefbaus. Erst eine zeitlich aufgelöste Bilanz erlaubt eine realistische Abbildung der tatsächlichen Emissionsentwicklung und kann aufzeigen, wann und in welchen Lebenszyklusphasen die größten Hebel für Klimaschutzmaßnahmen liegen. Der ökologische Schwerpunkt verlagert sich dann vom Energieverbrauch in der Nutzungsphase stärker hin zum Energieverbrauch für die Materialproduktion.

Diese Befunde haben unmittelbare Konsequenzen für die zukünftige Planungspraxis. Bei einer zunehmend CO₂-neutralen Energieversorgung werden bauliche Entscheidungen – etwa zur Konstruktionsweise, Materialwahl oder Erschließungstiefe – zu zentralen Stellgrößen für die Klimabilanz. Erhalt und Weiternutzung vorhandener Bausubstanz, Verwendung emissionsarmer Baustoffe, leichte und materialsparende Konstruktionssysteme sowie langlebige Gebäudestrukturen gewinnen an Bedeutung. Auch infrastrukturelle Maßnahmen, die früh im Lebenszyklus anfallen, behalten langfristig Gewicht, da ihre Emissionen nicht durch die Dekarbonisierung des Energiesystems kompensiert werden können. Hier zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere Tiefgaragen und flächenintensive Erschließungssysteme dauerhaft erhebliche Emissionsanteile verursachen.

Vor diesem Hintergrund bleibt das GWP auch in Zukunft ein zentraler Umweltindikator, jedoch nur, wenn es dynamisch interpretiert wird. Die klassische, statische Anwendung des GWP reicht künftig nicht mehr aus, um die ökologischen Auswirkungen von Siedlungsentwicklungen zutreffend zu erfassen. Der Indikator muss um zeitabhängige Emissionsfaktoren ergänzt werden, um die fortschreitende Dekarbonisierung abzubilden. Zudem sollten künftig zusätzliche Indikatoren einbezogen werden, um die durch den Rückgang der Betriebsemissionen relativ wichtiger werdenden Ressourcenverbräuche und Stoffströme zu erfassen. Dazu zählen insbesondere Kennwerte zum Ressourcenverbrauch, zur Materialeffizienz, zur Flächeninanspruchnahme und zu Boden- und Biodiversitätswirkungen.

Auch die Betrachtung der grauen Energie behält ihre Relevanz, muss aber im Kontext der dynamischen Entwicklung neu interpretiert werden. Während sie bislang primär als ergänzende Größe zum Energieverbrauch im Betrieb verstanden wurde, wird sie künftig zum wesentlichen Handlungsfeld. Mit zunehmender Dekarbonisierung der Betriebsenergie stellt die Reduktion grauer Emissionen – etwa durch Recyclingbaustoffe, optimierte Bauweisen oder modulare Systeme – einen der wichtigsten Beiträge zur Klimaneutralität im Bausektor dar.

Insgesamt zeigt die zeitlich aufgelöste Bilanzierung, dass der Übergang zu einer CO₂-neutralen Gesellschaft nicht allein durch eine Umstellung der Energieversorgung erreicht werden kann. Vielmehr verschiebt sich der Schwerpunkt der Emissionen von der Nutzungs- zur Herstellungsphase, wodurch Aspekte der Baukultur, der Materialwahl und der Flächeneffizienz eine zentrale Rolle einnehmen. Das GWP bleibt auch unter diesen Bedingungen ein aussagekräftiger Indikator, wenn es in dynamischer Form angewendet und durch weitere Umweltindikatoren ergänzt wird. Nur durch diese erweiterte und zeitlich differenzierte Betrachtung lassen sich die ökologischen Wirkungen neuer Siedlungen im Sinne einer ganzheitlich klimaneutralen Stadtentwicklung bewerten und steuern.

(6) Anwendung der Ergebnisse in Planung und Steuerung bei der kommunalen Siedlungsentwicklung

Die langfristigen ökologischen Wirkungen neuer Siedlungen werden maßgeblich in den frühen Phasen der Stadtentwicklung festgelegt. Viele klimarelevante Parameter, wie städtebauliche Dichte, Gebäudetyp, Organisation des ruhenden Verkehrs oder die Art der Energieversorgung sind strukturelle Charakteristika, die nach der Planungs- und Realisierungsphase kaum noch veränderbar sind. Damit wird die Phase der städtebaulichen Konzeptentwicklung zum entscheidenden Hebel für die Reduktion von Treibhausgasemissionen im Neubau.

Besonders geeignet ist die Berücksichtigung der Forschungsergebnisse in der Phase der städtebaulichen Vorplanung, also zwischen Flächennutzungsplanung und Bebauungsplanung. Hier kann die ökologische Bewertung von Strukturvarianten (z. B. Reihenhaus, Blockrand, Zeilenbebauung) als Bewertungskriterium in Wettbewerben oder Konzeptvergaben eingeführt werden, wenn noch mehrere städtebauliche Alternativen bestehen und ökologische Kriterien planerisch wie politisch durchsetzbar sind. Auf dieser Ebene können die im Projekt entwickelten Kennwerte und Vergleichsgrößen, wie etwa die mittleren GWP-Werte je Siedlungstyp, die spezifischen Emissionen für Infrastruktur oder Wärmeversorgungssysteme als Entscheidungsgrundlagen in kommunalen Planungsprozessen genutzt werden. Sie bieten eine empirisch fundierte Grundlage, um in der Phase der vorbereitenden Bauleitplanung und der städtebaulichen Wettbewerbe ökologische Zielgrößen zu definieren. Ergänzend lassen sich die Kennwerte in Wirkungsprognosen integrieren, die bereits vor der Festlegung des Bebauungsplans eine Abschätzung der CO₂-Bilanz einer Siedlung ermöglichen.

Nach Abschluss der konzeptionellen Phase sinkt der Einfluss der Steuerung erheblich. In der Objekt- oder Ausführungsplanung werden zwar Materialwahl, Bauweise und technische Systeme bestimmt, doch ist das strukturelle Emissionsniveau einer Siedlung zu diesem Zeitpunkt weitgehend festgelegt, was langfristige Pfadabhängigkeiten erzeugt. Für kommunale Entscheidungsträger besteht die Herausforderung darin, ökologische Kriterien nicht nur deklarativ, sondern verbindlich und überprüfbar in Planungs- und Entscheidungsprozesse zu integrieren. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse bieten hierfür eine wissenschaftlich belastbare Grundlage. Kommunen benötigen jedoch geeignete Steuerungsinstrumente und Verwaltungsstrukturen, um diese Erkenntnisse anwenden zu können. Erforderlich sind insbesondere:

- kommunale Bewertungsrichtlinien für städtebauliche Konzepte, die die Q-LCA-Kennwerte als Bewertungsparameter aufnehmen,
- verpflichtende Nachhaltigkeitsprüfungen für Neubaugebiete, analog zur Umweltprüfung nach BauGB,
- integrierte Klimabilanzen als Bestandteil von Bebauungsplanverfahren,
- standardisierte Berichtsvorlagen zur Dokumentation von GWP, Energiebedarf und Materialeinsatz in Wettbewerben und Konzeptvergaben.

Zudem sollte auf Landesebene geprüft werden, ob ökologische Bilanzierungskriterien über die Musterbauordnung oder über landesrechtliche Klimagesetze in die kommunale Planungspraxis integriert werden können.

Für kommunale Entscheidungsträger ergeben sich daraus mehrere Handlungsfelder:

- Planungsrechtliche Steuerung: Integration ökologischer Kriterien in Bebauungspläne und städtebauliche Verträge, z. B. durch Festlegung von städtebaulicher Dichte, Begrenzung von Tiefgaragen, Verpflichtung zu erneuerbarer Energieversorgung.
- Kooperative Instrumente: Anwendung von Ökobilanzkennwerten als Zuschlagskriterium in Wettbewerben, Einbindung in kommunale Wärmeplanung und Klimaschutzkonzepte.

- Informelle Instrumente: Muster- und Pilotprojekte, Aufbau digitaler Bilanzierungswerkzeuge, Leitfäden und Fortbildungsangebote um die Ergebnisse in der Verwaltungspraxis zu verankern.

Ziel sollte die Institutionalisierung einer ökologischen Bilanzprüfung als Bestandteil kommunaler Stadtplanung werden. Durch standardisierte Verfahren und transparente Kennwerte können Städte und Gemeinden künftig bereits in der Frühphase quantifizierte Klimawirkungen neuer Quartiere abschätzen und steuern. Damit kann die Q-LCA-Methodik zu einem praxisrelevanten Steuerungsinstrument werden, das die Kluft zwischen wissenschaftlicher Ökobilanzierung und kommunaler Planungspraxis überbrückt. Die Integration in rechtliche, vertragliche und informelle Prozesse eröffnet die Möglichkeit, ökologische Kriterien gleichberechtigt neben funktionalen und wirtschaftlichen Aspekten zu etablieren und damit einen zentralen Beitrag zur klimaneutralen Stadtentwicklung zu leisten.

9.2 Handlungsempfehlungen für eine klimafreundliche Siedlungsplanung

Zusammengefasst liefert das Forschungsprojekt eine Fülle von quantitativen Befunden und deutlichen Hinweisen, welche Maßnahmen für eine klimaverträgliche Siedlungsentwicklung priorisiert werden sollten. Aus den weitgehend sehr detailspezifischen Ergebnissen lassen sich einige allgemeine Handlungsempfehlungen für Planungsmaßnahmen ableiten, um neue Wohnquartiere möglichst emissionsarm zu gestalten.

(1) Kompakte Siedlungsformen mit einer hohen baulichen Dichte anstreben

Anstelle ausgedehnter Einfamilienhaussiedlungen sollten eher dichtere und mehrgeschossige Gebäudetypen wie mehrgeschossige Reihenhäuser, Zeilen- oder Blockrandbebauungen realisiert werden. Dadurch verringert sich der flächen- und personenbezogene Flächen-, Material- und Energieaufwand deutlich. Im Modell ergaben dichte Bautypen ein bis zu 30–40 % geringeres GWP/Person als lockere Bebauungen. Neben der direkten Emissionsreduktion werden auch Folgelasten gemindert. Weniger Landverbrauch bedeutet weniger Infrastrukturbedarf und tendenziell auch ein geringeres Verkehrsaufkommen. Zu beachten ist aber, dass die Effizienzgewinne nicht linear mit der Geschossigkeit der Gebäude zunehmen, sondern aufgrund von Abstandsflächenregelungen mit zunehmender Gebäudehöhe abnimmt. Ferner ist zu berücksichtigen, dass eine höhere Dichte einen größeren Bedarf an Stellplätzen nach sich zieht, der – wenn er in Form von Hoch- oder Tiefgaragen befriedigt wird – einen negativen Effekt auf das GWP des Quartiers hat.

(2) Suffizienz fördern: Wohnflächen pro Person reduzieren

Wohnkonzepte und Anreize zur Senkung des Pro-Kopf-Wohnflächenbedarfs, sind eine sehr effiziente Form einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung. Jede Verringerung um 5–10 m² Wohnfläche/Person kann das Siedlungs-GWP um ca. 12–25 % senken. Maßnahmen dafür sind kleinere, effizient geschnittene Wohnungen („Variowohnungen“), gemeinschaftliche Wohnmodelle (Mehrgenerationenhäuser, Wohngemeinschaften oder Clusterwohnungen) oder andere Formen des Flächen-Sharing (Gästewohnungen, Gemeinschaftsräume statt überschüssiger Privatfläche). Diese Suffizienzmaßnahmen bieten ein enormes Einsparpotenzial und sind oft kostengünstiger als rein technische Lösungen. Wichtig ist jedoch, dass die Bewohnerakzeptanz mitgedacht wird. Planer können Rahmenbedingungen schaffen (etwa flexible Grundrisse für verschieden große Haushalte), aber letztlich ist die Flächennutzung auch eine Frage des Lebensstils.

(3) Energieeffiziente Gebäude mit CO₂-neutraler Wärmeversorgung planen

Technische Exzellenz bei Gebäudehülle und Heizung bleibt essenziell. Hohe Energiestandards minimieren den Heizwärmebedarf und Wärmeversorgungsanlagen, die aus erneuerbaren Energien versorgt werden, z.B. über Wärmepumpen (individuell oder im Verbund) oder emissionsarme Wärmenetze reduzieren signifikant das GWP und ein wichtiger Beitrag zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung. Ein modernes Wärmepumpen-

system erreichte sehr geringe CO₂-Emissionen ($<<1 \text{ kg/m}^2\text{a}$), während konventionelles Erdgas um ein Vielfaches höher liegt. Planerisch müssen dafür frühzeitig die Weichen für eine zukunftsfähige Infrastruktur gestellt werden (Wärmenetz, Geothermie, lokale PV-Stromerzeugung etc.). Die Dekarbonisierung der Stromversorgung ist eine besonders wirksame Maßnahme, da der Haushaltsstrom bis zur Hälfte der Betriebsemissionen ausmachen kann und eine CO₂-freie Haushaltsstromversorgung auch ohne eine energetische Ertüchtigung der Gebäude einen hohen Minderungseffekt auf das Siedlungs-GWP hat.

(4) Robuste technische Systeme pragmatisch dimensionieren

Hochkomplexe Systeme (z.B. groß dimensionierte saisonale Speicher, doppelte Wärmeversorgungssysteme) können hohe graue Emissionen verursachen, die den Nutzen teilweise aufheben. Es sind einfachere, robuste Lösungen zu bevorzugen, die mit möglichst wenig Material auskommen, solange sie die erforderliche Effizienz erreichen. In vielen Siedlungsvarianten ist ein einfaches Wärmepumpensystem effizienter als ein aufwendiges kaltes Nahwärme-Netz mit vielen technischen Komponenten. Jede Technik sollte sich an ihrem Gesamt-CO₂-Fußabdruck messen lassen. Low-Tech-Strategien (mit passiver Solarenergienutzung, natürlicher Lüftung etc.) können graue Energie sparen, sofern sie die energetischen Anforderungen im Betrieb erfüllen.

(5) Emissionsarme Baustoffe und Konstruktionen wählen

Trotz moderater Effekte im Vergleich zu Betrieb und Städtebau sollten in Planung und Bauausführung nachhaltige Baustoffe bevorzugt werden. Wo möglich sollten Holz- und Hybridbauweisen, Recycling-Beton oder andere Sekundärbaustoffe eingesetzt werden. Selbst unter konservativen Modellierungsannahmen bringt ein Holzbau gegenüber einer mineralischen Bauweise ca. 6–8 % GWP-Ersparnis. Dies ist zwar kein allein entscheidender Hebel, aber in Kombination mit obigen Maßnahmen ein weiterer Baustein, der an Bedeutung gewinnt, je stärker die Betriebsenergie dekarbonisiert wird. Insbesondere bei den masseintensiven Bauteilen wie dem Tragwerk und der Gebäudehülle sollten energieintensive Materialien (Zement, Stahl) möglichst reduziert und durch nachwachsende Rohstoffe sowie innovative und materialsparame Konstruktionen ersetzt werden.

(6) Verkehrsinfrastruktur und Stellplätze minimieren

Wohngebiete sollten durch gute ÖV-Anbindungen, fußläufige und fahrradfreundliche Strukturen den MIV-Verkehr auf ein minimal nötiges Maß reduzieren. So kann der Bedarf an Straßen, Parkplätzen und insbesondere an Tiefgaragen minimiert werden. Die Studie zeigt, dass eine Reduktion von 1 auf 0 Stellplätze je Wohnung das Gesamt-GWP um ca. 12 % senken kann. Alternativen für Tiefgaragen können zentrale Quartiersgaragen sein sowie der Einsatz von Car-Sharing, begrünte Außenstellplätze oder modulare Parkhäuser, die zukünftig anders nutzbar oder einfach rückbaubar sind. Jede vermiedene Tiefgarage spart erhebliche Beton- und Stahlmengen (graue Emissionen) und verhindert später schwer rückbaubare Strukturen. Andererseits reduziert sich die Flächenversiegelung für den ruhenden Verkehr im Außenraum, was gegeneinander abzuwägen ist. Hier ist politische Unterstützung gefragt, z.B. durch die Anpassung der Stellplatzverordnung, um niedrigere Quoten oder Ablösebeiträge für ÖPNV zu ermöglichen.

(7) Ressourcenschonende Infrastrukturen planen

Erschließungsnetze sollten möglichst kompakt und dem Bedarf angemessen geplant werden, deren Nutzungseffizienz durch eine höhere bauliche Dichte gesteigert wird. Kürzere Straßen, gemeinschaftlich genutzte Ver- und Entsorgungseinrichtungen und Mehrfachnutzung von Trassen reduzieren den Materialeinsatz. Überdimensionierte (Straßen-)Profile sollten vermieden werden. Eine klimagünstige Gestaltung der Freiflächen (geringe Versiegelung, Begrünung und Nutzung lokaler Baumaterialien) hat zwar eine eher geringe direkte Wirkung auf das GWP, bringt aber andere Umweltvorteile.

(8) Ökobilanz-Tools frühzeitige in den Planungsprozess integrieren

Um die erwähnten Synergien optimal zu nutzen, sollte bereits in frühen Planungsphasen eine ganzheitliche Bilanzierung stattfinden. Hierfür gibt es bereits eine Vielzahl an verfügbaren Instrumenten (vergl. Kapitel 2.7 sowie Excel-Tools wie in diesem Forschungsprojekt entwickelt), um verschiedene Siedlungsentwürfe hinsichtlich ihrer Umweltwirkung zu vergleichen. Die hier entwickelte modulare Systematik ließe sich in kommunalen Planungstools verankern, um z.B. bei Bebauungsplänen die Klimaauswirkungen verschiedener Dichten, Bautypen und Versorgungsvarianten transparent zu machen. Diesen könnten künftig noch um weitere Module (Verkehr, Konsum der Bewohner, etc.) ergänzt werden. Planer und Entscheider sollten LCA-Erkenntnisse als Entscheidungsgrundlage heranziehen, um fundierte Kompromisse zwischen Wohnraumschaffung und Klimaschutz zu schließen.

9.3 Limitationen der Forschungsmethodik und Datenqualität

Die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse beruhen auf einem komplexen Zusammenspiel von Auswertung empirischer Datengrundlagen und deren Übersetzung in modellhafte Annahmen und methodische Vereinfachungen. Das entwickelte Gesamtmodell basiert auf einer Vielzahl von Parametern, deren Zusammenwirken die Gesamtbilanz einer Siedlung bestimmt. Es war das Ziel des Forschungsprojekts, die relevanten städtebaulichen, infrastrukturellen und bautechnischen Einflussgrößen möglichst realitätsnah abzubilden, es beansprucht jedoch keine universelle Übertragbarkeit auf alle Siedlungs- oder Planungskontexte. Wie bei allen quantitativen Untersuchungen auf Systemebene sind die Ergebnisse in einem definierten Anwendungsrahmen zu interpretieren und mit Unsicherheiten behaftet.

(1) Methodische Limitationen

Die Grenzen der Forschung liegen vor allem in der vereinfachten Abbildung realer Siedlungsstrukturen der beschränkten Datenverfügbarkeit und den notwendigen Standardisierungen im Modellaufbau. Für einzelne Parameter, etwa die Materialintensität bestimmter Bauweisen, die energetische Effizienz zukünftiger Gebäudetechnologien oder die Dynamik von Strom- und Wärmemix, mussten Annahmen getroffen werden, die auf aktuellen Forschungsständen basieren, aber Unsicherheiten im zeitlichen Verlauf aufweisen. Auch der Ausschluss indirekter Emissionen, etwa durch Mobilität oder Flächennutzung außerhalb des Quartiers, begrenzt die Vollständigkeit der Bilanz.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus dem Untersuchungsrahmen. Q-LCA bezieht sich ausschließlich auf Neubauprojekte und geht methodisch von einem Bauen „auf der grünen Wiese“ aus. Aspekte der Innenentwicklung, des Rückbaus oder der Umnutzung von Bestandsquartieren wurden nicht untersucht. Damit bildet das Modell einen wichtigen, aber spezifischen Ausschnitt des Siedlungswesens ab.

Auch die gewählte Methode der Lebenszyklusanalyse unterliegt inhärenten Grenzen. Die Erhebung der erforderlichen Flächen- und Stoffmengen ist mit erheblichem Aufwand verbunden, was zu vereinfachten Erfassungsverfahren und pauschalierten Annahmen führen kann. Hinzu kommt, dass die standardisierte Methodik reale Abweichungen – etwa durch individuelle Nutzerverhalten oder betriebliche Besonderheiten – nur eingeschränkt erfasst. Faktoren wie Mobilitäts-, Konsum- oder Flächennutzungsverhalten beeinflussen erheblich die Energie- und Stoffströme und die damit verbunden klimawirksamen Emissionen einer Siedlung. Diese menschlichen Verhaltenskomponenten wurden aufgrund fehlender standardisierter Bewertungsverfahren nicht integriert. Ebenso basiert die Modellierung auf standardisierten Siedlungssegmenten, wodurch reale Siedlungen nur annäherungsweise abgebildet werden können.

Zugleich bieten diese Limitationen wertvolle Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung der Quartiersökobilanzierung. Künftige Forschung kann hier ansetzen, um dynamische Energie- und Stoffstrommodelle, sozial-

räumliche Faktoren, Nachverdichtungsszenarien oder Mobilitätsverhalten systemisch in die Bilanzierung zu integrieren. In diesem Sinne versteht sich die vorliegende Untersuchung nicht als abschließende Bewertung, sondern als methodischer Beitrag zur fortlaufenden Präzisierung, Skalierung und Anwendbarkeit ökologischer Bewertungsinstrumente in der kommunalen Planungspraxis.

(2) Datenunsicherheiten

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt unmittelbar von der Qualität der zugrunde liegenden Daten jedes einzelnen Parameters ab. Für die Datenqualität sind insbesondere drei Kriterien maßgeblich: die korrekte Quantifizierung der eingesetzten Materialien und Stoffmengen, die Auswahl der Konstruktionsdetails sowie die Qualität der Umweltbewertung der verwendeten Materialien auf Basis standardisierter Datenbanken (ÖKOBAUDAT, EPDs etc.). Unsicherheiten in diesen Bereichen konnten vor allem durch den Vergleich mit bestehenden Studien und durch Gespräche mit Expertinnen und Experten reduziert werden, blieben aber aufgrund der methodischen Komplexität nicht gänzlich vermeidbar.

Eine spezifische Einschränkung betrifft die getroffene Annahme, dass Gebäude ab drei Geschossen grundsätzlich mit Tiefgaragen versehen sind, während kleinere Gebäudetypen Hochgaragen zugeordnet wurden. Da Tiefgaragen einen deutlich höheren Beitrag zum Treibhausgaspotenzial leisten, führt diese Modellannahme zu einer systematischen Differenz zwischen großen und kleinen Gebäudetypen. In der Realität existiert diese klare Trennlinie jedoch nicht: Zahlreiche mehrgeschossige Gebäude werden ohne Tiefgarage errichtet, während auch niedrigere Bauformen gelegentlich Tiefgaragen aufweisen. Damit bildet das Modell eine idealtypische, aber vereinfachte Realität ab, deren Übertragbarkeit auf konkrete Einzelfälle begrenzt ist.

Zur systematischen Qualitätskontrolle aller eingegebenen Parameter wurden potenzielle Fehlerquellen identifiziert und deren Größenordnung abgeschätzt. Dabei lassen sich mehrere Kategorien der Fehleranfälligkeit unterscheiden:

- Unvollständigkeit oder fehlerhafte Annahmen bei der Definition übergeordneter Systemparameter,
- Ungenauigkeiten bei der Mengenermittlung, insbesondere durch pauschalisierte Flächenermittlungen und vereinfachte Dimensionierungen,
- Fehler bei der Zuordnung oder Auswahl von Konstruktionen und Baustoffen aufgrund eingeschränkter Variantenvielfalt,
- Verwendung unzureichender oder veralteter Datensätze aus bestehenden Ökobilanzdatenbanken.

Zur Reduktion dieser Unsicherheiten wurden verschiedene Maßnahmen umgesetzt. Dazu zählen eine umfassende Literaturrecherche und Expertenbefragungen zur Validierung zentraler Parameter sowie die transparente Darstellung aller Annahmen, sodass diese bei Bedarf überprüft und korrigiert werden können.

(3) Modellbewertung

Die Modellentwicklung selbst wurde in einem interdisziplinären Expertenworkshop evaluiert und weiterentwickelt. Die Typisierung idealtypischer Siedlungen erfolgte auf Basis pauschalierter Annahmen und Mittelwerte, die eine robuste, aber generalisierte Abbildung verschiedener Siedlungsformen ermöglichen. Besonders betroffen von diesen Vereinfachungen ist die Auswahl der bilanzierten Konstruktionen und Baumaterialien. Recycelte Baustoffe wurden nicht berücksichtigt und die untersuchten Bauteile repräsentieren standardisierte Durchschnittskonstruktionen - weder besonders klimaschonende noch besonders emissionsintensive Varianten. Gebäudeteile mit komplexer Geometrie, wie Erker oder Vorsprünge, blieben unberücksichtigt, um die Modellkomplexität im ersten Entwicklungsschritt zu begrenzen.

Die Ergebnisse des Rechenmodells spiegeln daher die zugrunde liegenden Annahmen wider und sind nur im Rahmen dieser Vorbedingungen valide. Die abgebildeten Parameter und ihre Beziehungen beruhen auf vereinfachten Rechenmodellen, deren Validierung über Vergleichsstudien und Expertenurteile erfolgte. Für jeden einzelnen Parameter wurde eine möglichst hohe Datengüte angestrebt, doch bleibt eine gewisse Unsicherheit bestehen, da die Bandbreiten der realen Ausprägungen – insbesondere bei den Baukonstruktionen – nur begrenzt abgebildet werden können.

Insgesamt stellt das Q-LCA-Modell trotz dieser Limitationen ein methodisch robustes und transparentes Instrument zur ökologischen Bewertung von Neubauquartieren dar. Seine Stärke liegt in der systematischen Erfassung wesentlicher Einflussgrößen und in der Möglichkeit, unterschiedliche Planungsvarianten vergleichend zu bewerten. Zugleich zeigt es die Richtung zukünftiger Forschungsarbeiten auf: die Integration von Nutzerverhalten, Mobilität, Recyclingmaterialien und Innenentwicklungsszenarien sowie die Erweiterung der Datenbasis und Geometrievarianten zur weiteren Präzisierung der ökologischen Bilanzierung von Siedlungen.

9.4 Weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Ein zentraler Arbeitsschwerpunkt dieses Forschungsprojekts lag in der Entwicklung eines parametrischen Modells zur morphologischen, qualitativen und quantitativ-komparativen Modellierung von Siedlungsstrukturen unter Anwendung der Methode der Lebenszyklusanalyse. Ziel war es, komplexe räumliche und strukturelle Zusammenhänge zwischen gebauten Umwelten, Infrastruktur und Ressourcenflüssen systematisch zu erfassen und vergleichbar zu machen.

Im Verlauf der intensiven Auseinandersetzung mit der Thematik blieben abschließend zumindest drei zentrale Fragestellungen zu erörtern:

1. Welche Erfordernisse ergeben sich für die methodische Weiterentwicklung des Q-LCA-Modells?
2. Welche Daten- und Modellierungsherausforderungen bestehen speziell bei der Anwendung von LCA auf Infrastruktursysteme?
3. Welche weiterführenden methodischen Ansätze lassen sich allgemein für zukünftige Entwicklungen der Lebenszyklusanalyse aktuell identifizieren?

Diese Fragen verknüpfen die spezifischen Ergebnisse des Projekts mit grundlegenden methodologischen und strukturellen Themen der LCA-Forschung. Sie betreffen insbesondere die Virulenz und Situierung der Methode im Kontext multiskaliger und intersektoraler LCA-Modelle, die sich von der Gebäude- bis zur Stadtebene erstrecken.

Dabei zeigte sich die zentrale Herausforderung, einerseits der zunehmenden wissenschaftlichen Vertiefung und Spezialisierung gerecht zu werden, und andererseits deren Integration in die planerische und politische Praxis sicherzustellen. Die Komplexität der Methode verlangt eine Balance zwischen wissenschaftlicher Präzision und praktischer Anwendbarkeit.

Über allem steht daher die Leitfrage, wie wissenschaftliche Erkenntnisse der Lebenszyklusanalyse in umsetzbare Handlungsansätze überführt werden können – wie also der Brückenschlag zwischen methodischer Tiefe und praktischer Relevanz gelingt. Dieses Spannungsfeld zwischen Forschung, Modellierung und Anwendung bildet den Rahmen der folgenden Ausführungen.

(1) Methodische Weiterentwicklung von Q-LCA

Eine zentrale Aufgabe zur Weiterentwicklung von Q-LCA betrifft die kontinuierliche Datengenauigkeit der zugrunde liegenden Modellannahmen. In bisherigen Modellen sind wesentliche Parameter – etwa Fensterflächenanteile, Nutzerverhalten oder tageszeitliche Energiegewinne und -verluste – nur in stark vereinfachter Form berücksichtigt worden. Diese Vereinfachungen führen zu einer eingeschränkten Abbildungsgenauigkeit der realen Energie- und Stoffflüsse innerhalb urbaner Strukturen. Eine stärkere Interaktivität der Modelle sowie die Integration jahreszeitlicher und nutzungsbedingter Schwankungen würden die Realitätsnähe der Bilanzierungen erheblich verbessern und so die Aussagekraft der Ergebnisse erhöhen.

Darüber hinaus eröffnet die Berücksichtigung neuer Bau- und Materialstrategien – insbesondere der Einsatz recycelter Baustoffe im Hoch-, Tief- und Straßenbau, modularer und rückbaubarer Bauweisen – bedeutende GWP-Minderungspotenziale die in den bisherigen Modellannahmen nicht berücksichtigt wurden. In Kombination mit einem Kostenmodul (Life cycle costing, LCC) zur Abbildung ökologischer und ökonomischer Kosten-Nutzen-Effizienz ließe sich eine integrierte Bewertung realisieren, die ökologische und wirtschaftliche Optimierungspfade gleichermaßen sichtbar macht. Die Einbindung ökonomischer Grenznutzenanalysen kann dabei helfen, Maßnahmen nicht nur hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkung, sondern auch in Bezug auf ihre finanzielle Effizienz besser zu bewerten.

Im Hinblick auf die Quartiers- und Mobilitätsinfrastruktur stellt die Einbeziehung oberirdischer Quartiersgaragen einen bislang unzureichend untersuchten, jedoch relevanten Aspekt dar. Im Rahmen der Projektlaufzeit konnte diese bauliche Varianten wie auch andere Aspekte nicht betrachtet werden, besitzen jedoch gegenüber Tiefgaragen aufgrund ihres geringeren Erdaushubs, des reduzierten Einsatzes erdberührter Bauteile und ihrer modularen Bauweise deutliche ökologische Vorteile. Zugleich ermöglichen sie eine flexible Umnutzung bei künftig sinkendem Stellplatzbedarf und tragen damit zur langfristigen Anpassungsfähigkeit urbaner Strukturen bei.

Von besonderer Bedeutung ist zudem die Dynamisierung von Datensätzen und Systemgrenzen. Statische Betrachtungen führen – wie in Kapitel 7.3 exemplarisch dargestellt – häufig zu verzerrten Ergebnissen, da sich die Technologien zur übergeordneten Energieversorgung, Materialherstellungsprozesse und Nutzungsverhalten im Zeitverlauf verändern. Künftige Bewertungsmodelle sollten daher dynamische LCA-Ansätze integrieren, die Dekarbonisierungspfade, technologische Innovationen und veränderte Nutzerpraktiken abbilden. Auf diese Weise können Entwicklungen wie der Übergang zu klimaneutralen Energiesystemen realitätsnäher in die Ökobilanzierung einfließen.

Ein weiteres Entwicklungsfeld betrifft die energetische Sanierung des Bestands. Hier besteht ein erheblicher Forschungsbedarf, um die Wechselwirkungen zwischen baulichen Maßnahmen, Energieversorgungssystemen sowie ökologischen und ökonomischen Effekten umfassend zu erfassen. Im Folgeprojekt „BQ-LCA – Lebenszyklusanalysen von Maßnahmen einer ökologisch-orientierten und sozialverträglichen Bestandsentwicklung von Siedlungen der 1950er bis 1970er Jahre“ werden diese Fragen für Siedlungen in den genannten Baualterklassen untersucht. Methodik und Ergebnisse sollen so gut als möglich an Q-LCA anschließen. Die Integration dieser Aspekte in Q-LCA soll wesentlich dazu beitragen, praxisrelevante Strategien für eine nachhaltige Bestandsentwicklung zu formulieren.

Darüber hinaus bietet die Umnutzung bestehender Siedlungsstrukturen ein großes Potenzial, um praxisnahe Fragen der ökologischen Optimierung zu adressieren. Aufbauend auf den Erkenntnissen des vorliegenden Forschungsprojekts könnte künftige Forschung dazu beitragen, bestehende Hemmnisse bei der Integration ökologischer Kriterien in kommunale Planungsprozesse zu überwinden und Nachhaltigkeit stärker in die Entscheidungslogik der Stadtentwicklung zu verankern.

Parallel zur methodischen Weiterentwicklung der Modelle sollte die Benutzerfreundlichkeit der Q-LCA-Anwendung verbessert werden. Hierfür ist die Entwicklung eines intuitiven Interfaces zur Dateneingabe und Ergebnisdarstellung sowie die Einbindung automatisierter Schnittstellen zur kontinuierlichen Aktualisierung von Ökobilanzdaten empfehlenswert. Eine solche Systemarchitektur würde die langfristige Pflege, Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit von LCA-Ergebnissen erheblich verbessern.

Insgesamt zeigt sich, dass die methodische Weiterentwicklung von Q-LCA eine integrierte Betrachtung dynamischer, technischer und sozioökonomischer Dimensionen erfordert, um das Modell und die Ergebnisse zu optimieren. Q-LCA kann dann noch besser als ein Instrument für richtungssichere Entscheidungen für eine nachhaltige, klimaangepasste und ressourceneffiziente Stadtentwicklung dienen.

(2) Daten- und Modellierungsherausforderungen bei Infrastruktur-LCA

Die Erstellung von Ökobilanzen für Infrastrukturen ist methodisch besonders anspruchsvoll, da valide Bewertungen über komplexe, heterogene Systeme mit einer langen Lebensdauer bei zugleich unsicheren Zukunftspfaden entstehen sollen. Die Modellentwicklung erfordert zunächst geeignete Definitionen zu den funktionalen, räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen sowie prospektive Annahmen zur Entwicklung von Technologien im Allgemeinen sowie Energiesystemen im Besonderen, zu Marktentwicklungen und Nutzerverhalten. Hier bestehen also große Unsicherheiten für die Modellierung, was durch fehlende Primärdaten über neue Technologien und die schwierige Übertragbarkeit von Labor- auf Systemmaßstab verschärft wird. Stadtenergiesysteme, Wasser- und Abwassernetze sowie Verkehrsinfrastrukturen verlangen gekoppelte Modellierungsansätze (z. B. Energiesystem-, hydraulische oder digitale Stadtmodelle), um die vor- und nachgelagerten Prozesse konsistent abbilden zu können. Diese komplexen Modellierungsanforderungen benötigen einerseits ein spezialisiertes Wissen über die jeweiligen technologischen Besonderheiten der modellierten Systeme, zugleich aber auch ein breite methodische und organisatorische Querschnittskompetenzen, das sich am ehesten in kompetenten, interdisziplinären Teams realisieren lässt.

Neben der Verwendung von praxisnahe Tools oder automatisierte Datenimporte sind nicht zuletzt große Datenlücken zu schließen. Für Tiefbaukomponenten oder Infrastrukturnetze fehlt es oft an aktuellen, regionalisierten Datensätzen. Hintergrunddatenbanken bilden teils veraltete Zustände ab, die langfristige Szenarien über einen Zeitraum von 50 bis 100 Jahren nur bedingt geeignet sind. Nützlich wäre der Aufbau und die Pflege einer Datenplattform, die analog zur ÖKOBAUDAT Baustoffmengen, Lebensdauern, Emissionsfaktoren und Instandhaltungszyklen technischer Infrastrukturen erfasst und mit internationalen Standards (z. B. ecoinvent) harmonisiert sowie öffentlich zugänglich ist.

(3) Weiterführende methodische Ansätze in der Lebenszyklusanalyse

Die Methode der Lebenszyklusanalyse wurde und wird kontinuierlich weiterentwickelt, um die Grenzen konventioneller, statischer Ansätze zu überwinden. Derzeit lassen sich zumindest einige zentrale Entwicklungsrichtungen in der wissenschaftlichen Diskussion identifizieren, die neue Perspektiven für eine präzisere und umfassendere Nachhaltigkeitsbewertung von Bau-, Infrastruktur- und Siedlungssystemen eröffnen:

Dynamische LCA: Klassische Ökobilanzen beruhen auf statischen Annahmen und vernachlässigen zeitliche Veränderungen in Energieerzeugung, Technologie und Nutzungsverhalten. Dynamische LCAs integrieren zeitabhängige Parameter in Sach- und Wirkungsbilanzen und berücksichtigen etwa Veränderungen des CO₂-Faktors im Strommix über mehrere Jahrzehnte. Zeitaufgelöste Emissionsfaktoren und prospektive Szenarien erhöhen die Genauigkeit von Bilanzierungen insbesondere bei langlebigen Infrastrukturen.

Sozial-ökologische Ansätze (S-LCA, LCSA): Neben ökologischen Indikatoren rücken zunehmend soziale und ökonomische Aspekte in den Fokus. Die Social Life Cycle Assessment (S-LCA) bewertet Arbeitsbedingungen, Gesundheit und gesellschaftliche Teilhabe entlang der Wertschöpfungskette. Aufbauend darauf integriert

die Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) ökologische (LCA), soziale (S-LCA) und ökonomische (Life Cycle Costing, LCC) Dimensionen zu einem umfassenden Nachhaltigkeitsrahmen. Trotz vorhandener Leitfäden (UNEP/SETAC) bestehen weiterhin Defizite bei Datenverfügbarkeit, Quantifizierung und Standardisierung sozialer Indikatoren.

Räumlich differenzierte LCA: Da Umweltwirkungen stark von geographischen und klimatischen Bedingungen abhängen, gewinnen standortspezifische Analysen an Bedeutung. Regionale Unterschiede in Strommix, Wasserverfügbarkeit oder Bevölkerungsdichte beeinflussen die Wirkungsbewertung erheblich. Neue Ansätze verknüpfen georeferenzierte Wirkungsfaktoren mit GIS-Modellen, um Infrastrukturen hinsichtlich Wasserentnahme, Schadstoffbelastung oder Landnutzung standortgenau zu analysieren. Die Integration von Monitoringdaten, Sensorik und Fernerkundung ermöglicht Echtzeit-Analysen von Nutzung und Auslastung. So können Ineffizienzen frühzeitig erkannt und Sanierungsstrategien datenbasiert entwickelt werden. Räumlich differenzierte LCAs bieten insbesondere für großflächige Infrastrukturen Potenzial für belastbare, skalierbare Bewertungen, die methodisch zwischen Quartier-, Stadt- und Regionalebene verknüpft werden können.

Intersektorale und hybride LCA-Ansätze: Intersektorale LCAs betrachten Umweltauswirkungen über Wirtschafts- und Technologiesektoren hinweg und identifizieren Wechselwirkungen, die in isolierten Analysen übersehen werden. So beeinflusst etwa die Elektrifizierung des Verkehrs auch Rohstoffförderung, Energieversorgung und Recyclingprozesse (Hertwich, 2021). Hybride Ansätze kombinieren prozessbasierte Modelle mit ökonomischen Input-Output-Analysen oder technischen Simulationen und ermöglichen damit Systemvollständigkeit bei zugleich hoher Detailtiefe (Crawford et al., 2018). Neuere Entwicklungen koppeln LCA mit Energie- oder Materialflussmodellen und nutzen maschinelles Lernen (ML) oder Natural Language Processing (NLP), um fehlende Prozessdaten zu schätzen oder automatisch zu extrahieren (Romeiko, 2023; Popowicz et al., 2025).

KI-gestützte LCA: Die zunehmende Verfügbarkeit digitaler Umwelt- und Produktionsdaten fördert die Integration künstlicher Intelligenz in die LCA-Methodik. KI-gestützte Ansätze beschleunigen Datenaufbereitung und Analyse, ermöglichen automatisierte Datenergänzungen und erhöhen die Prognosefähigkeit. Damit leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung, erfordern jedoch weiterhin menschliche Expertise zur Sicherung von Validität, Transparenz und ethischer Vertretbarkeit. Zentrale Herausforderungen betreffen Datenqualität, Modellnachvollziehbarkeit und die Etablierung verbindlicher Validierungsstandards.

Die genannten Entwicklungen markieren den Übergang von der statischen zur dynamisch-integrierten LCA. Durch die Kombination zeitlicher, sozialer und räumlicher Dimensionen entsteht ein realistischeres Abbild der Umweltwirkungen von Infrastrukturen. Die LCA bleibt damit ein zentrales Instrument für wissenschaftlich fundierte Planungs- und Entscheidungsprozesse. Zukünftige Forschung wird sich auf standardisierte Schnittstellen, offene Datenmodelle und erklärbare KI-Methoden konzentrieren. Basierend auf der Literatur lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- KI sollte als Assistenzsystem, nicht als Ersatz menschlicher Expertise eingesetzt werden (Romeiko, 2023)
- Strikte Validierung von ML-Modellen durch Kreuzvalidierung und externe Testdatensätze (Blanco et al., 2024)
- Transparente Dokumentation und Nachvollziehbarkeit von Datenquellen und Modellen (Köck et al., 2023)
- Domänenspezifische Anpassung und klare Definition des Anwendungsbereichs (Martínez-Ramón et al., 2024)
- Ethische und regulatorische Rahmenbedingungen müssen berücksichtigt werden (Popowicz et al., 2025).

10. Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr.-Ing. Michael Prytula
Forschungsprofessur Ressourcenoptimiertes und klimaangepasstes Bauen
Fachhochschule Potsdam, Fachbereich STADT I BAU I KULTUR
E-Mail: michael.prytula@fh-potsdam.de

Prof. Dipl.-Ing. Tim Rieniets
Professor für Stadt- und Raumentwicklung in einer diversifizierten Gesellschaft
Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Architektur und Landschaft, Institut für Entwerfen und Städtebau
E-Mail: rieniets@staedtebau.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Joachim Rosenberger
Leibniz Universität Hannover, Akademischer Rat und Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsprojekt Q-LCA
E-Mail: joachim.rosenberger@staedtebau.uni-hannover.de

Jana Hack, MA Sc.
Fachhochschule Potsdam, Akademische Mitarbeiterin im Forschungsprojekt Q-LCA
E-Mail: jana.l.hack@gmail.com

Luzia Stallmann, B.Sc.
Fachhochschule Potsdam, Wissenschaftliche Hilfskraft im Forschungsprojekt Q-LCA
E-Mail: luzia.stallmann@fh-potsdam.de

Niclas Gebhardt, MA Sc.
Fachhochschule Potsdam, Akademischer Mitarbeiter im Forschungsprojekt BQ-LCA
E-Mail: niclas.gebhardt@fh-potsdam.de

Weitere Mitwirkende

Dipl.-Ing. Holger Wolpensinger
Gründer, Inhaber und Geschäftsführer von greenUP Bauforschung
E-Mail: wolpensinger@greenup.one

Kristina Viehmann, Werkstudentin bei greenUP Bauforschung
E-Mail: viehmann@greenup.one

greenUP Bauforschung war und ist an mehr als 40 größeren wissenschaftlichen Studien im politischen Umfeld beteiligt, die Entscheidungsgrundlagen oder Ziele für die Gebäude- und Quartiersplanung erarbeitet oder evaluiert haben. Baukosten- und Lebenszyklusbetrachtungen, sowie Energie-, Klima- und Ökobilanzen im Baubereich sind Schwerpunkte der Arbeiten des greenUP-Teams.

Seit 2011 berät greenUP Architektur & Bauberatung mit Sitz in Bonn bundesweit. Seit dem Jahr 2000 unterstützt der greenUP-Gründer und Geschäftsführer Dipl.-Ing. Holger Wolpensinger Planungs- und Entscheidungsprozesse von Bauvorhaben und Arealentwicklungen in Vollzeit. Seit 1994 vermittelt er Themen des nachhaltigen Bauens in Veröffentlichungen, Vorträgen und anderen Veranstaltungsformaten einer interessierten Öffentlichkeit.
<https://greenup.one/>

Fachliche Betreuung

Anne Bauer, Dipl. Ing.

Referentin Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Referat WB 3 – Forschung und Innovation im Bauwesen

Verena Kluth

Referentin Forschung im Bauwesen

im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Referat WB 3 – Forschung und Innovation im Bauwesen

Weitere Projektbeteiligte

Im Rahmen eines Online-Workshop am 19.03.2024 zur Modellevaluation waren folgende Personen beteiligt (alphabetische Reihenfolge):

- Dr. Stephan Anders, Quartierszertifizierung, Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
- Dipl. Ing. Anne Bauer, Projektbetreuerin beim BBSR
- Prof. Dr. Gunar Gutzeit, Professur für Siedlungswasserwirtschaft - Schwerpunkt Wasserversorgung, FHP
- Dipl. Ing. Jeanette Hanco, Nachhaltigkeitskoordinatorin beim Kommunalen Immobilienservice (KIS) der Landeshauptstadt Potsdam
- Dipl. Ing. Stephan Rössig, Ökobilanzierung, BBR (Bundesamt für Bau und Raumordnung)
- Dr. Georg Schiller, Leibniz Institut für ökologische Raumentwicklung
- Dipl. Ing. Holger Wolpensinger, greenUP Bauforschung

Die Personen, die am Workshop teilgenommen haben, waren zuvor bereits durch Interviews über das Projekt informiert und haben neben weiteren Interviewpartner*innen wichtige inhaltliche und / oder methodische Beiträge zum Projekt geleistet (siehe 10.2 Interview-Verzeichnis, S. 154). Allen Projektbeteiligten sei an dieser Stelle herzlich für ihr Engagement gedankt.

Ein besonderer Dank gilt Dr. Stephan Anders für den Einblick in das "dgnb_Quartiere_Master-Tool", das eine hilfreiche Inspiration zur technischen Umsetzung des eigenen, in diesem Forschungsprojekt entwickelten Rechenblatts war.

Quartiere / Industriestandorte, Version 2016 + 2020

Erstellt durch die DGNB Geschäftsstelle, Copyright DGNB GmbH

Stand 26.10.2022

10.1 Kurzbiographien



Foto: Andrea Hansen

Prof. Dr.-Ing. Michael Prytula

ist Architekt und seit 2014 Forschungsprofessor für „Ressourcenoptimiertes und klimaangepasstes Bauen“ an der Fachhochschule Potsdam. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in energetisch-stofflichen und raumplanerischen Fragestellungen zu einer nachhaltigen Transformation urbaner Systeme. Er ist Studiengangsleiter vom Masterstudiengang Urbane Zukunft.



Foto: Julian Martitz

Prof. Dipl.-Ing. Tim Rieniets

studierte Architektur und ist Stadtplaner. Seit 2018 ist er Professor am Institut für Entwerfen und Städtebau der Leibniz Universität Hannover. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der nachhaltigen Transformation von Architektur und städtischen Räumen. Seit 2014 hat er unter dem Begriff „Umbaukultur“ zahlreiche Studien, Publikationen, Vorträge, Kampagnen und Pilotprojekte in diesem Bereich realisiert.



Foto: Julian Martitz

Dr.-Ing. Joachim Rosenberger

ist Architekt und Bauassessor. Er hat an den Universitäten Hannover und Stuttgart sowie an der ETH Zürich Architektur mit dem Schwerpunkt Städtebau studiert und anschließend in verschiedenen international tätigen Architekturbüros sowie in Planungsbehörden gearbeitet. Derzeit forscht und lehrt er im Bereich Städtebau an der Abteilung für Stadt- und Raumentwicklung der Leibniz Universität Hannover.



Foto: Andrea Hansen

Jana Hack, M.Sc.

ist Doktorandin am Fraunhofer ISI und bearbeitete das Projekt Q-LCA von Februar 2023 bis Ende 2024 als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachbereich STADT | BAU | KULTUR der Fachhochschule Potsdam. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen neben der Lebenszyklus- Betrachtung transformativer Systeme, in der Wirkungsanalyse von Ressourcen- und Energieeffizienzmaßnahmen.



Foto: Andrea Hansen

Niclas Gebhardt, M.Sc.

ist Architekt und Energieeffizienz-Experte. Seit April 2025 forscht er zudem als akademischer Mitarbeiter im Bereich „Ressourcenoptimiertes und klimaangepasstes Bauen“ an der Fachhochschule Potsdam. Nach seinem Studium in Weimar und Barcelona war er für renommierte Architekturbüros in Berlin und London tätig. Sein Schwerpunkt in Forschung und freiberuflicher Praxis liegt in der nachhaltigen Transformation des baulichen Bestands.



Foto: Simon Dibbern

Luzia Stallmann, B. Sc.

ist wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für „Ressourcenoptimiertes und klimaangepasstes Bauen“ an der FH Potsdam. Sie hat Architektur in Weimar studiert und Arbeitserfahrung in Architekturbüros in Basel und Leipzig gesammelt. Derzeit studiert sie im Master Urbane Zukunft. Ihr Schwerpunkt liegt im nachhaltigen Bauen und der Ökobilanzierung.



Foto: Leonie Leder

Martje Anett Banck, M.Sc.

war wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl „Stadt- und Raumentwicklung“ an der Leibniz Universität Hannover, an der sie sowohl den Bachelor in Architektur als auch den Master in Architektur und Städtebau absolvierte. Aktuell ist sie in einem Architektur- und Stadtplanungsbüro in Hamburg tätig.



Foto: Inka Borchers

Inka Borchers, B.Sc.

hat ihren Bachelor in Architektur an der Leibniz Universität Hannover abgeschlossen und studiert derzeit im Master Architektur und Städtebau. Während des Studiums ist sie als studentische Hilfskraft am Institut für Entwerfen und Städtebau tätig. Nach Arbeitserfahrungen in Architektur- und Bauingenieurbüros in Stuttgart und Hannover möchte sie ihren Fokus im Master auf nachhaltige Stadtentwicklung legen.

Projektpartner greenUP Bauforschung



Foto: greenUP

Dipl.-Ing. Holger Wolpensinger

Architektur und Energieanlagenelektroniker, Gründer, Inhaber und Geschäftsführer von greenUP Bauforschung mit den Arbeitsschwerpunkten: Nachhaltige Quartiere, Bauforschung, Gebäude-Energiekonzepte und -Ökobilanzen. Architektur-Studium an der TU Karlsruhe (heute KIT) mit Schwerpunkt Nachhaltiger Wohnungsbau.



Foto: greenUP

Kristina Viehmann, B.A.

ist Werkstudentin bei greenUP Bauforschung mit den Arbeitsschwerpunkten: Wärmepumpen, Technische Gebäudeausrüstung (TGA), Erneuerbare Energiekonzepte und LCA. Studium der Energie- und Gebäudetechnik mit Vertiefung Technische Gebäudeausrüstung an der Technischen Hochschule Köln.

10.2 Interviews

Tabelle 14:

Darstellung der Interview-Partner in chronologischer Reihenfolge

Datum	Name	Firma / Organisation
31.03.2023	Dipl.-Ing. Stephan Rössig	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
24.04.2023	Prof. Dr. Gunar Gutzeit	FH Potsdam, Fachgebiet Infrastrukturplanung, Prof. für Siedlungswasserwirtschaft - Schwerpunkt Wasserversorgung
05.05.2023	Prof. Dr. Matthias Kowald	Hochschule RheinMain (Frankfurt), Mobilitätsmanagement und Mobilitätsverhalten
12.05.2023	Dr.-Ing. Stefan Anders	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
04.12.2023	Dr.-Ing- Georg Schiller	IÖR Dresden, Leiter der Forschungsgruppe Anthropogene und Natürliche Ressourcen
16.01.2024	Dipl.-Ing. Holger Wolpensinger	greenUP-Architektur und Bauberatung, Bonn
13.02.2024	Prof. Dr. Ronny Sorge	FH Potsdam, Prof. für Bau und Planung von Verkehrswegen
16.04.2024	Alberto Espina	Mitarbeiter BBSR, Referat WB 6 - Instrumente des ressourcenschonenden und klimaangepassten Bauens
07.10.2024	Prof. Dr. André Brendike	FH Potsdam, Fachbereich 3 - Beuingenieurwesen, Prof. für Statik

10.3 Dissemination

Ergänzende Berichtsteile

Rieniets, T., Rosenberger, J., Prytula, M., Hack, J., 2025: Q-LCA. Städtebauliche Merkmale einer klimaorientierten Quartiersplanung. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17866335>

Prytula, M., Rieniets, T., Rosenberger, J., Hack, J., Stallmann, L., Gebhardt, N., 2025: Quartiersökobilanz. Lebenszyklusvergleich der Treibhausgasemissionen von Siedlungsstrukturen. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau – Forschung KOMPAKT 4/2025. Bonn. <https://doi.org/10.58007/emv5-v885>

Prytula, M., Rieniets, T., Rosenberger, J., Hack, J., Stallmann, L., Gebhardt, N., 2025: Q-LCA. Forschungsdatenbericht. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17866716>

Wissenschaftliche Publikationen

Hack, J., Prytula, M., Rieniets, T., Rosenberger, J., 2025: Life Cycle Assessment for Urban Planning: A Modular Approach to Integrating Buildings and Infrastructure. *Circ.Econ.Sust.* (2025). Springer.
<https://doi.org/10.1007/s43615-025-00671-8>

Rieniets, T., Rosenberger, J. 2025: Klimafaktor Straße. Empfehlungen für eine Siedlungsplanung der Zukunft. In: *Unimagazin. Forschungsmagazin der Leibniz Universität Hannover*, Ausgabe 03/04.2025: 44-47
https://www.uni-hannover.de/fileadmin/luh/content/alumni/unimagazin/2025_Mobilitaet/Unimagazin_3-4_2025_hochaufgeloest__1_.pdf

Rieniets, T., Rosenberger, J., 2025: Q-LCA – Eine Lebenszyklusanalyse auf städtebaulichem Maßstab in Neppel, M., Giral, M. (Hg.): *Transforming Cities and Labor. Building Better Less Different*. Birkhäuser. *In Vorbereitung*

Prytula, M., 2025: Quartiersökobilanz - Analyse der Umweltwirkungen von Infrastrukturen und Gebäuden unterschiedlicher Siedlungsstrukturen in ihrem Lebenszyklus. Sonderband in *archimaera*. *In Vorbereitung*

Vorträge

05.06.2024 - Prof. Dr.-Ing. Michael Prytula: Quartiersökobilanz (Q-LCA). Analyse der Umweltwirkungen von Infrastrukturen und Gebäuden unterschiedlicher Siedlungsstrukturen in ihrem Lebenszyklus. Im Rahmen des Symposiums "Dauer und Vergänglichkeit". Betrachtungen zur Lebensdauer von Bauwerken", ausgerichtet vom Institut für Bauforschung und Bauhaltung (IBB) der Fachhochschule Potsdam.
<https://www.fh-potsdam.de/aktuelles-medien/termine/symposium-dauer-und-vergaenglichkeit-betrachtungen-zur-lebensdauer-bauwerken>

12.09.2024 - Jana Hack: Enhancing life cycle analysis of residential settlement structures through modularity of building & infrastructure parameters. Konferenzbeitrag. First International Conference of the Hellenic Society for Circular Economy (HSCE): Circular Economy. The pathway towards a Sustainable Development in Catania (Griechenland), 12.-13.09.2024
<https://hsce.gr/wp-content/uploads/2024/09/HSCE-Conference-2024-Final-Programme.pdf>

26.04.2025 - Prof. Dr.-Ing. Michael Prytula: Urban Metabolism. A Framework for Analysing Human-Environment Relationships. Vortrag im Rahmen des internationalen Symposiums „Building within Planetary Boundaries - Scales and Practices of Sustainable Development“ in Osaka (Japan), 23.-26. April 2025
<https://theorie.arch.rwth-aachen.de/international-symposium-building-within-planetary-boundaries/>
<https://www.dwih-tokyo.org/en/event/building-within-planetary-boundaries-scales-and-practices-of-sustainable-development/>

Hochschulseminare

Wintersemester 2022/23: Starke Typen. Seminar im Masterstudiengang Architektur und Städtebau an der Leibniz Universität Hannover. Systematische Erhebung und Typisierung von Neubausiedlungen in Deutschland (Baubeginn 2010 – 2020). Durchführung: Prof. Dipl.-Ing. Tim Rieniets, Dr. Joachim Rosenberger, MSc. Martje Banck, MSc. Frauke Michalski.

Wintersemester 2023/24: Quartiersökobilanz. Ökologische Bewertung verschiedener Siedlungstypen durch Lebenszyklusanalysen. InterFlex-Seminar FH Potsdam. Durchführung: Prof. Dr.-Ing. Michael Prytula, Jana Hack, M.Sc. und Jeannette Hanko, Dipl.-Ing. Arch., Mitarbeiterin im Kommunalen Immobilien Service (KIS) der LHP.

Glossar

Im Glossar werden vor allem alle Begriffe definiert, von denen die Autoren und Autorinnen des Berichts annehmen, dass diese für das Verständnis von besonderer Bedeutung sind. Das sind einerseits wichtige methodische und technische Fachbegriffe, sowie andererseits besondere Konstrukte (wie z.B. Siedlungssegmente), für die es keine allgemeingültigen Definitionen gibt und so bei den Lesern und Leserinnen stark abweichende Interpretationen ermöglichen.

Online-Glossar zu weiteren Fachbegriffen: <https://www.enargus.de/wiki/>

Glossar des Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/service/glossary>

Begriff	Definition
Bebauungstyp	Die Gesamtheit immer gleicher Gebäudetypen in einer Siedlungsvariante wird in dieser Studie als Bebauungstyp bezeichnet.
Bruttogeschossfläche	Der Begriff Bruttogeschossfläche wird häufig synonym zu dem Begriff Bruttogrundfläche (BGF) verwendet. Er ist allerdings in Deutschland in keiner Norm definiert.
Bruttogrundfläche	Die Bruttogrundfläche [nach DIN 277] umfasst die gesamte Fläche aller Grundrissebenen, die vollständig oder teilweise von Wänden umschlossen sind. Dazu zählen alle nutzbaren und nicht nutzbaren Flächen sowie alle Verkehrs-, Technik- und Konstruktionsflächen. (Baunetz Wissen, "Ermittlung von Grundflächen", https://www.baunetzwissen.de/digitales-buero/fachwissen/kosten-und-vertraege/ermittlung-von-grundflaechen-und-rauminhalten-8606045)
Betriebsphase	Die Betriebsphase ist die Phase der aktiven Nutzung im Lebenszyklus eines Gebäudes. Für den Betrieb wird z.B. Wärme-, Strom-, Wasserzufuhr benötigt.
CO₂-Äquivalent	Emissionen anderer Treibhausgase als Kohlendioxid (CO ₂) werden zur besseren Vergleichbarkeit entsprechend ihrem globalen Erwärmungspotenzial in CO ₂ -Äquivalente umgerechnet (CO ₂ = 1). https://www.umweltbundesamt.de/service/glossary/c
Dachtyp	Der Dachtyp beschreibt die Dachform des Gebäudes. In dieser Forschungsarbeit wird zwischen Satteldach und Flachdach unterschieden.
Daten-Dashboard	Ein Daten-Dashboard (oder einfach Dashboard) ist eine visuelle Oberfläche, auf der wichtige Daten und Kennzahlen übersichtlich dargestellt werden. Filterfunktionen ermöglichen eine interaktive Auswahl und Analyse von Daten, da die Ergebnisse verschiedener Parameter zugleich und in ihrer Wechselwirkung angezeigt werden.
Dichte/ Dichtetyp	Der Dichtetyp beschreibt die Anzahl und Geschossigkeit von Gebäuden im definierten Siedlungssegment. Sie beschreibt mit dem Gebäudetyp die städtebauliche Setzung der Gebäude. In dieser Forschungsarbeit wird zwischen geringer, mittlerer und hoher Dichte unterschieden.

Elementarfluss	Inputs und Outputs eines Systems können sowohl Stoffflüsse als auch Energieflüsse sein. In der Ökobilanz wird zudem in Elementarflüsse und Produktflüsse unterschieden. <i>Elementarflüsse</i> sind Flüsse, die direkt der Umwelt entnommen werden, wie bspw. Erze oder gasförmige Emissionen. Produktflüsse sind Flüsse aus anderen technischen Systemen wie bspw. Halbzeuge, Schmierstoffe, Katalysatoren oder Ähnliches. Ein Beispiel für einen Elementarfluss ist die Emission von Kohlendioxid aus einem Kraftwerk, ein Produktfluss wäre bspw. der Strom, der in dem Kraftwerk produziert wird. https://enargus.de/pub/bscw.cgi/d10960-2/*/*Sachbilanz?op=Wiki.getwiki&search=HTL
Energiekennwert	bezeichnet in dieser Studie wird den Jahresheizwärmebedarf pro Quadratmeter Nutzfläche. Einheit: $\text{kWh/m}^2_{\text{Nutzfläche}} \cdot \text{a}$
Energiebedarf	Der Energiebedarf ist die prognostizierte Energiemenge, die künftig zur Deckung bestimmter Bedürfnisse benötigt wird, etwa für Heizung, Beleuchtung oder Antrieb. Er beschreibt den erwarteten Verbrauch, im Unterschied zum tatsächlichen Energieverbrauch.
Energiemix	bezeichnet eine Mischung von verschiedenen Energieträgern an der bereitgestellten Energie.
Erschließungstyp	siehe -> Kreuzung, Kurve, Wendehammer als Erschließungstypen von -> Siedlungssegmenten sowie -> Raster, Schlaufe, Sackgasse als Erschließungstypen für -> Siedlungstyp
Gebäudetyp	Der Gebäudetyp beschreibt die Konfiguration von Wohneinheiten und Kubatur eines Gebäudes. In dieser Forschungsarbeit werden sechs Gebäudetypen unterschieden: Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihnhaus, Zeilenhaus, Punkthaus, Block.
Global Warming Potential (GWP)	Treibhausgase verfügen über ein unterschiedliches Erderwärmungspotenzial, das sogenannte „Global Warming Potential“ (GWP). Als Richtgröße dient die Klimawirksamkeit von Kohlendioxid (GWP von CO_2 ist gleich 1), d. h. die Treibhauspotenziale anderer Stoffe bemessen sich relativ zu CO_2. Der GWP-Wert wird als CO_2-Äquivalent ($\text{CO}_2\text{-eq}$) ausgewiesen und gibt das Treibhauspotenzial eines Stoffes und damit seinen Beitrag zur Erwärmung der bodennahen Luftschicht an. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Glossar/gwp.html
Haushaltsstrom	Haushaltsstrom bezeichnet die elektrische Energie, die in privaten Haushalten für den Betrieb alltäglicher Geräte verwendet wird. Dazu zählen unter anderem Beleuchtung, Kühlschrank, Waschmaschine, Fernseher, Computer oder Ladegeräte. Zum Haushaltsstrom zählt in der Regel nicht der Strom für Heizung und Warmwasser. Da diese über separate Systeme wie eine Wärmepumpe betrieben werden, werden sie als Heizstrom erfasst.
Holzbauweise	In dieser Forschungsarbeit wird zwischen Holz- und Massivbauweise unterschieden. Die Holzbauweise ist durch tragende Holzrahmenkonstruktionen sowie Decken und Sattel- bzw. Flachdächer in Holzausführung definiert. Dies bedeutet nicht, dass alle Bauteile ausschließlich aus Holz oder nachwachsenden Materialien bestehen, da ein Haus in derzeit üblicher Bauweise angenommen wird. Die konstruktiven Details sind im Anhang dokumentiert.

Idealtypische Siedlung	Unter einer idealtypischen Siedlung werden vorliegend Siedlungen verstanden, die aus jeweils 6 Siedlungssegmenten mit einheitlichen Gebäude- und Dichtetypen bestehen. Durch die Addition unterschiedlicher Erschließungssegmente können idealtypische Siedlungen mit einer Gitter-, Schlaufen- oder Sackgassenerschließung gebildet werden. Ihre städtebaulichen Kennwerte sind aus der Analyse des realen Siedlungsgeschehens abgeleitet.
Kurve (Erschließungstyp)	Kurve, Kreuzung und Wendehammer gehören zur Kategorie "Erschließungstyp Segment". Kurve bedeutet, dass eine Straße in einem 90°-Winkel von einer Seite zu einer anderen Seite auf dem Siedlungssegment führt. Addiert ergeben mehrere Kurvensegmente den Siedlungstyp Schlaufe.
Kreuzung (Erschließungstyp)	Kurve, Kreuzung und Wendehammer gehören zur Kategorie "Erschließungstyp Segment". Kreuzung bedeutet, dass sich zwei Straßen in der Mitte des Segments treffen. Alle vier Seiten des Segments haben also einen Straßenzugang. Addiert ergeben mehrere Kreuzungssegmente den Siedlungstyp Raster.
Kostengruppen	Die Kostengruppen (KG) nach DIN 276 (Norm für die Kostenplanung im Bauwesen) sind ein System zur systematischen Gliederung von Baukosten in Deutschland und dienen als Grundlage von Kostenberechnungen im Bauwesen. Die Baukosten werden hierfür hierarchisch in einem dreistufigen System nach Hauptgruppen (erste Ziffer), Untergruppen (erste und zweite Ziffer) und Feingruppen (drei Ziffern) differenziert. Die größte Aufschlüsselung ist folgend aufgelistet: KG 100 - Grundstück KG 200 - Vorbereitende Maßnahmen (vorher: Herrichten und Erschließen) KG 300 - Bauwerk – Baukonstruktionen KG 400 - Bauwerk – Technische Anlagen KG 500 - Außenanlagen und Freiflächen (vorher: Außenanlagen) KG 600 - Ausstattung und Kunstwerke KG 700 - Baunebenkosten KG 800 - Finanzierung
Lebenszyklusanalyse	siehe -> Life Cycle Assessment
Leitungen (Haus- oder Sammelleitungen)	Leitungen dienen dem Transport der für sie vorgesehenen Medien, wie Trink- oder Abwasser, elektrischem Strom oder Wärme. Hausleitungen, auch als Grundleitungen bezeichnet, sind im Erdreich oder in der Grundplatte verlegte Leitungen, die beispielsweise das im Gebäude anfallende Abwasser dem Anschlusskanal zuführen. Sammelleitungen sind freiliegende, horizontale Rohrleitungen, die sich in der Regel innerhalb eines Gebäudes befinden und dazu dienen, das Abwasser aus Fall- und Anschlussleitungen aufzunehmen und zur weiteren Entsorgung zu leiten.
Life Cycle Assessment	Life Cycle Assessment (LCA) (dt. <i>Ökobilanz</i> oder <i>Lebenszyklusanalyse</i>) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen entlang des gesamten Lebenswegs »von der Wiege bis zur Bahre«. Dazu gehören sämtliche Umweltwirkungen, die während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung sowie den damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozessen, wie beispielsweise der Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, entstehen.

Massivbauweise	In dieser Forschungsarbeit wird zwischen Holz- und Massivbauweise unterschieden. Massivbauweise definiert sich durch Kalksandstein-Mauerwerk im Wandbereich und in Stahlbeton ausgeführten Decken bzw. Flachdächer. Einzelne Bauteile (wie z.B. Satteldächer und Treppen bei den kleinen Gebäudetypen) werden auch in der Massivbauweise in Holz angenommen, da dies der derzeit üblichen Bauweise entspricht. Die im Bericht verwendeten konstruktiven Details sind im Anhang dargestellt.
Mehrgeschosshaus (MGH)	Mehrgeschosshaus (MGH) wird in diesem Bericht synonym für den Gebäudetyp "Block/Winkel" (B/W) verwendet
Nettogeschossfläche	Die Nettogeschossfläche ist in keiner Norm definiert. Sie umfasst vorliegend die Summe aller Grundflächen eines Gebäudes, exklusive aller Außen- und Innenwände sowie sonstiger Bauelemente (Versorgungsschächte, etc.). Die Nettogeschossfläche beinhaltet neben bewohnbaren oder gewerblich nutzbaren Räumen auch Flure, Treppenhäuser oder Lagerräume.
Nettogrundfläche	Die Nettogrundfläche (NGF) wird nach DIN 277 als die Summe aller nutzbaren Flächen aller Grundrissebenen eines Gebäudes bezeichnet. Die Nettogrundfläche beschreibt dabei diejenigen Flächen, die uneingeschränkt zu Wohnzwecken oder zur gewerblichen Nutzung geeignet sind.
Nettowohnfläche	Dieser Begriff wird nur in der Schweiz verwendet. Es gibt die Nettogrundfläche, die "Wohnfläche" (ist kein stehender Begriff und kommt aus der Wohnflächenverordnung WoVIF) und die Nutzungsfläche (DIN 277).
Ökobilanz	siehe -> Life Cycle Assessment
Quartier	Das Quartier ist eine Größeneinheit, die ein Stadtviertel beschreibt. In dieser Forschungsarbeit wurden zur Typologisierung der Siedlungen Neubauquartiere als Grundlage analysiert, die zwischen 2010 und 2020 in Deutschland geplant und zumeist realisiert wurden.
Raster (Erschließungstyp)	Raster, Schlaufe und Sackgasse gehören zur Kategorie "Erschließungstyp Siedlung". Raster bedeutet, dass mehrere Kreuzungssegmente zusammen ein gitterförmiges Straßennetz ergeben. Dieser Erschließungstyp kommt in der Praxis typischerweise bei Blockstrukturen vor.
Sackgasse (Erschließungstyp)	Raster, Schlaufe und Sackgasse gehören zur Kategorie "Erschließungstyp Siedlung". Sackgasse bedeutet, dass die angrenzenden Häuser ausschließlich von einer Seite erschlossen werden. Sackgassen werden durch eine Zusammensetzung der Segmente Kreuzung und Wendehammer gebildet und kommen in der Praxis typischerweise in Einfamilienhausstrukturen vor.
Siedlungsbereiche	Siedlungsbereiche bezeichnen Teilbereiche realer Siedlungen mit einheitlichen Gebäude- und Erschließungstypen sowie städtebaulichen Dichten. Sie bilden die Grundlage für die Modellierung der Siedlungssegmente.
Siedlungssegment	In dieser Forschungsarbeit ist das Siedlungssegment die kleinste Einheit, in der der Gebäude-, Erschließungs- und Dichtetyp abgebildet werden. Ein Siedlungssegment umfasst 1 ha. Sechs Siedlungssegmente bilden eine "idealtypische" Siedlung (6 ha).

Siedlungstyp	In dieser Forschungsarbeit ist der Siedlungstyp durch den vorhandenen Gebäudetyp definiert. Es wird zwischen Einfamilienhaussiedlung, Doppelhaussiedlung, Reihenhaussiedlung, Zeilenhaussiedlung, Punkthaussiedlung und Blocksiedlung unterschieden.
Siedlungsstrukturtyp	Konnten besondere Häufungen bei der Kombination der drei Strukturmerkmale Gebäudetyp, Erschließungstyp sowie Siedlungsdichte identifiziert werden, so gilt diese Kombination in der vorliegenden Untersuchung als Siedlungsstrukturtyp.
Schlaufe (Erschließungstyp)	Raster, Schlaufe und Sackgasse gehören zur Kategorie "Erschließungstyp Siedlung". Schlaufe bedeutet, dass die Straße nur eine begrenzte Anzahl an Häusern erschließt und wieder zurück auf die "Hauptstraße" führt. Schlaufen werden durch eine Zusammensetzung der Segmente Kreuzung und Schlaufe gebildet.
Siedlungsvariante	Eine Siedlungsvariante ist eine idealtypische Siedlung (6 ha), die hinsichtlich Gebäudetyp, Konstruktion, Wärmeversorgungssystem, Energiekennwert oder städtebaulicher Dichte eine charakteristische Ausprägung hat. Insgesamt wurden in dieser Studie 972 Siedlungsvariante bilanziert.
Stellplatztyp	Stellplätze für den ruhenden Verkehr werden in dieser Forschungsarbeit in Abhängigkeit von Dichte- und Gebäudetyp bestimmt. Bei Ein-, Doppel- und Reihenhäusern erfolgt die Bereitstellung überwiegend über Straßenstellplätze. In Mehrfamilienhäusern ergänzen Tiefgaragen das Angebot. Mit zunehmender Siedlungs- und Bewohnerdichte steigt der Anteil an Stellplätzen in Tief- und Hochgaragen.
Tool	Tool bezeichnet in dieser Forschungsarbeit ein Rechenwerkzeug oder eine Software, mit der Planende und Forschende die Umweltauswirkungen verschiedener Komponenten von Gebäuden oder Siedlungen ermitteln, um daraus Entscheidungsgrundlagen für die (Siedlungs-)planung abzuleiten. In der Praxis wird zwischen Bilanzierungs- und Planungstools unterschieden, häufig vereint ein Tool beide Funktionen.
Variante	In dieser Forschungsarbeit werden verschiedene Ausprägungen von Merkmalen wie Gebäudetyp, Bauart, Dichtetyp und Erschließungstyp (im Modell als Parameter bezeichnet) kombiniert und ergeben 972 Varianten. So lässt sich ermitteln, welche Variablen zu geringen oder hohen Umweltauswirkungen in den jeweiligen Siedlungen führen. Die Varianten veranschaulichen diesen Vergleich.
Wärmeversorgung	Die Wärmeversorgung von Gebäuden und Siedlungen umfasst die Bereitstellung von Wärmeenergie zur Beheizung von Räumen und zur Warmwasserbereitung. Dies kann durch verschiedene technische Systeme erfolgen, die unterschiedliche Systemkomponenten zur Wärmeerzeugung, -transport und -übergabe umfassen.
Wendehammer (Erschließungstyp)	Kurve, Kreuzung und Wendehammer gehören zur Kategorie "Erschließungstyp Segment". Wendehammer bedeutet, dass die Straße in das Segment hineinführt und dort endet.

Literaturverzeichnis

- ages**, 2000: Verbrauchskennwerte 1999 Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland. Münster. Zugriff: https://www.delta-q.de/wp-content/uploads/2021/12/kennwerte_grundflaeche.pdf [abgerufen am 21.03.2025].
- Agora Industrie; ifeu; RISE und Ramboll**, 2024: Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor: Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe. Zugriff: https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-10_IND_Embodied_Carbon/A-IN_341_Embodied_Carbon_WEB.pdf
- Alaux, N.; Obrecht, T. P.; Saade, M. R.M.; Passer, A.**, 2024: A Need for Sufficiency in the Built Environment: Prospective Life Cycle Assessment of the Austrian Building Stock. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1363 (1): 12002. DOI: 10.1088/1755-1315/1363/1/012002.
- Andes, L.**, 2019: Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung – Grundlagen, Indikatoren, Hilfsmittel. Bearbeitung: Lisa Andes, Thomas Lützkendorf, Benjamin Ströbele, Jürgen Kopfmüller, Christine Rösch. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Anderson, J. E.**, 2014: Expanding the use of life-cycle assessment to capture induced impacts in the built environment. Dissertation an der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der TU München. Zugriff: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1221435/document.pdf>
- ARGE e.V.**, 2022: Wohnungsbau: Die Zukunft des Bestandes. Bauforschungsbericht Nr. 82. Studie zur aktuellen Bewertung des Wohngebäudebestands in Deutschland und seiner Potenziale, Modernisierungs- und Anpassungsfähigkeit. Herausgeber: Dietmar Walberg, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.. Zugriff: <https://www.gdw.de/media/2022/02/studie-wohnungsbau-tag-2022-zukunft-des-bestandes.pdf> [abgerufen am 21.03.2025].
- Baccini, P.**, 2008: Zukünfte urbanen Lebens mit Altlasten, Bergwerken und Erfindungen. In: von Gleich, A. / Gößling-Reisemann S. (Hrsg.): Industrial Ecology. Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen. Vieweg+Teubner: Wiesbaden, 218-237.
- Bader, R.; Baumann, I.; Ihle, C.**, 2021: Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima/Lüftung, Anlagenmechanik SHK Ausbildung und Praxis. Köln, Bildungsverlag EINS.
- Bayerische Architektenkammer**, 2021: Merkblatt zur Flächenberechnung. Bayerische Architektenkammer. Zugriff: https://www.byak.de/data/pdfs/Recht/Merkblaetter/M_Flaechenberechnung_byak.pdf [abgerufen am 15.08.2024].
- BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.)**, 2016: EQ II. Erweiterte Bilanzierung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen auf Quartiersebene. ExWoSt-Informationen 48/1, Berlin
- BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung**, 2020: Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt. BBSR-Online-Publikation 17/2020. Zugriff: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [abgerufen am 02.04.2025].
- BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung**, 2023: Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp.html> [abgerufen am 12.08.2024].
- BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft**, 2021: Strombedarf der Haushalte. Durchschnittlicher Stromverbrauch (ohne Heizstrom) je Haushalt nach Haushaltsgrößen. Stand: 7/2021. Zugriff: https://www.bdew.de/media/documents/Grafik_BDEW_Stromverbrauch_Haushalte_nach_Gr%C3%B6%C3%9Fe.pdf [abgerufen am 18.03.2025].

BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, 2023: Wie heizt Deutschland 2023? - Langfassung - Studie zum Heizungsmarkt. Zugriff: https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Heizungsmarkt_2023_Langfassung_final_28.11.2023_korrigiert.pdf [abgerufen am 26.07.2024].

BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, 2024: Statusreport: Wärme, Basisdaten und Einflussfaktoren des Wärmeverbrauchs in Deutschland, Stand 27.6.2024. Zugriff: https://www.bdew.de/media/documents/Statusreport_Waerme_Stand_27_06_2024.pdf [abgerufen am 26.07.2024].

Behrens, H., 2011: Passivhaus-Objektdokumentation Passivhaus Holbeinstr. 88a Dresden. Herausgeber: Passivhaus-Institut. Zugriff: https://passivehouse-database.org/#d_1968 [abgerufen am 15.08.2024].

Bimesmeier, T.; Gruhler, K.; Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Steinmetzer S., 2020: Sekundärstoffe aus dem Hochbau. Energie- und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärstoffen aus dem Hochbau für den Baubereich. Abschlussbericht für BBSR, Zukunft Bau. Zugriff:

Blanco, C. F., et al. (2024). Machine learning to support prospective LCA of emerging technologies. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140706.

Breuer, B.; Schmell, R., 2012: Neue Stadtquartiere. Bestand und städtebauliche Bedeutung. BBSR-Analysen KOMPAKT 08/2012. Bonn.

Buchert, Matthias et al., 2004: Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland. Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich "Öffentliche Infrastruktur". Autoren: Matthias Buchert, Uwe Fritsche, Wolfgang Jenseit, Lothar Rausch, Clemens Deilmann, Georg Schiller, Stefan Siedentop und Adrian Lipkow. Umweltbundesamt, Umweltplanung Nr. 01/2004. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/short/k2600.pdf>

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2023: Informationsblatt CO2-Faktoren – Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss. Eschborn.

Bundesministerium der Justiz, 2015: Bewertungsgesetz (BewG) Anlage 24 (zu § 190 Absatz 1 Satz 3 und Absatz 2 und Anlage 23). Zugriff: https://www.gesetze-im-internet.de/bewg/anlage_24.html [abgerufen 02.01.2023]

Bundesregierung, 2019: Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Zugriff: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf> [abgerufen am 26.07.2024].

Bundesregierung, 2020: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG). Zugriff: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf> [abgerufen am 26.07.2024].

Bundesstiftung Baukultur (Hrsg.) 2017: Baukultur Bericht 2016/17 - Stadt und Land. Bearbeitung: Deutsches Institut für Urbanistik (Difu), Daniela Michalski (Projektleitung), Franciska Frölich v. Bodelschwingh, Ricarda Pätzold, Wolf-Christian Strauss, Prof. Dipl.-Ing. Martin zur Nedden, Ana Shalin Stoeckermann in Kooperation mit Planungsgruppe Stadt + Dorf, Berlin. Zugriff: <https://www.bundesstiftung-baukultur.de/publikationen/baukulturbericht/2016-17>

Bundesstiftung Baukultur (BSBK), 2018: Besser Bauen in der Mitte. Ein Handbuch zur Innenentwicklung. Potsdam: 24. Zugriff: https://www.bundesstiftung-baukultur.de/fileadmin/files/medien/8349/downloads/bsbk_besser-bauen-in-der-mitte.pdf [abgerufen am 21.02.2025].

Bußwald, P.; Niederl, F.; Finker, C.; Lichtenwöhrer, P.; Neugebauer, G.; Stöglehner, G., 2019: Embodied Energy, Costs and Traffic in Different Settlement Patterns. Background projects and tools. Herausgeber: Sintef akademisk forlag. Zugriff: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2609394> [abgerufen am 21.03.2025].

BWP - Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2009: Heizen und Kühlen mit Abwasser. Energie-rückgewinnung aus häuslichen und kommunalen Abwasser. Ratgeber für Bauträger und

Kommunen. rme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG). Zugriff: https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/bwp-Heizen_und_Kuehlen_mit_Abwasser.pdf [abgerufen am 26.07.2024].

Crawford, R. H., Bontinck, P.-A., Stephan, A., Wiedmann, T., & Yu, M. (2018). Hybrid life cycle assessment: Methodology and applications. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1273–1284.

Curdes, G., 1997: Stadtstruktur und Stadtgestaltung. Stuttgart: Kohlhammer

Deilmann, C.: Szenarien der Rohstoff- und Flächeninanspruchnahme für das Bauen und Wohnen 2025. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 53 (2004) Heft 1-2

Deutsches Institut für Normung, 1978: DIN 1998: Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen, Richtlinien für die Planung, Herausgeber: Beuth Verlag. Berlin.

DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2018: DGNB System. Kriterienkatalog Gebäude Neubau 2018. Stuttgart. Zugriff: https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/bestellung/downloads/DGNB_Kriterienkatalog_Nebau_EV_2018.pdf [abgerufen am 14.04.2023].

Dollhopf, S., 2021: Ansätze zur Energie- und CO₂-Bilanzierung bei dem Bau von Entwässerungssystemen. Masterthesis. Hafen City Universität Hamburg, Hamburg.

Dollhopf, S., 2022: Vergleichende Bilanzierung des Treibhauspotenzials und des Primärenergiebedarfs verschiedener Rohwerkstoffe bei dem Bau von Abwasserkanälen. In: Ingo Weidlich, Gersena Banushi, Sven Büschken, Stefan Dollhopf und Doyle (Hg.): *Technisches Infrastrukturmanagement: HafenCity Universität Hamburg*, S. 25–32. Zugriff: https://repos.hcu-hamburg.de/bitstream/hcu/837/1/2022-02-14_TIM_Kapitel-Vergleichende_bilanzierung_des_Treibhauspotenzials.pdf, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Donath, D.; Ruth, J.; Tschetwertak, J.; Hollberg, A.; Schneider, S.; Liebold, B.; Bielik, M.; Fuchkina, E., 2018: Integrierte Lebenszyklusoptimierung Methoden zur systematischen Variantenexploration in frühen Phasen der Planung unter besonderer Berücksichtigung von Lebenszyklusaspekten. Endbericht eines Forschungsprojekts gefördert mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des BBSR. Zugriff: https://www.irbnet.de/daten/Inhaltsverzeichnisse/fb_F_3093.pdf

ee concept, Fuchs, M; Görich, K; Rechert, L; Tersluisen, A.; Willeke, A.; Zeumer F., 2021: SNAP Planungs- und Arbeitshilfen. Systematik für Nachhaltigkeitsanforderungen in Planungswettbewerben. Herausgeber: BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2021/band-29-dl.pdf> [abgerufen am 21.03.2025].

Ebert, B.; Rodenbücher, B.; Köhler, B.; Hess, S.; Bongs, C.; Wagner, A., 2020: Systematische Analyse der Mehrfamilien-Bestandsgebäude. Herausgeber: Fraunhofer ISE. Zugriff: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/7d7182a4-346c-4630-b696-737d1efcd134/details> [abgerufen am 21.03.2025].

Erhorn-Kluttig, H.; Wössner, S.; Budde, E.; Erhorn, H., 2020: Energieversorgung: Software für Quartiersenergiekonzepte. QUARTIER 2.2020. Zugriff: <https://www.magazin-quartier.de/article/energieversorgung-software-fuer-quartiersenergiekonzepte/>

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), 2006: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. Köln.

Freudenau, H.; Siebert, S.; Bußkamp, M; Bosch-Lewandowski, S.; Ganser, R.; Krug, H; Runge, M., 2021: Neue Stadtquartiere – Konzepte und gebaute Realität. Herausgeber: BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn. Zugriff: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-04-2021-dl.pdf;jsessionid=900DA-3BE137B7807DA9B58927B53E128.live11291?__blob=publicationFile&v=2 [abgerufen am 15.08.2024].

Frischknecht, R., 2005: Methoden der Umweltbewertung technischer Systeme. Ökobilanzen (Life cycle assessment, LCA). Zugriff: <https://p2infohouse.org/ref/37/36512.pdf> [abgerufen am 21.02.2025].

Fuchs, L., 2023: Handlungsempfehlungen zur Klimaneutralität im kommunalen Rohrleitungsbau. Fachhochschule Potsdam. Potsdam.

Gengnagel, C. / Apellániz, D, 2023: Lebenszyklusanalyse und parametrischer Raumentwurf. Zugriff: <https://www.nbau.org/2023/04/17/lebenszyklusanalyse-und-parametrischer-raumentwurf/>

Gruhler, Karin et al. (2002): Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe - Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen. Autoren: Gruhler, Karin; Böhm, Ruth; Deilmann, Clemens; Schiller, Georg. IÖR-Schriften Band 38, Dresden.

Hafner, A., 2021: Umsetzung einer ressourcenschonenden Quartiersentwicklung in der ökologischen Mustersiedlung Prinz-Eugen-Park in München (Q-PEP). Abschlussbericht des Forschungsvorhabens gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Zugriff: https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34225_01-Hauptbericht.pdf

Hauke, B.; Hein, H. L. (2024) Ökobilanzierung im Bauwesen – Mit CO₂ als zweiter Währung verändern sich Bedeutung und Anwendung. Bautechnik 101, H. 1, S. 29–39. Zugriff: <https://doi.org/10.1002/bate.202300100>

Hegger, M. et al. 2012: EnEff:Stadt. UrbanReNet. Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum. Schlussbericht, Stuttgart

Hegger, M. et al. 2014: EnEff:Stadt. UrbanReNet Phase II. Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum. Schlussbericht, Stuttgart

Hegger, M., Dettmar, J. (Hrsg.), 2016: Energetische Stadtraumtypen: Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen, Stuttgart

Heinkelmann, J., Loni Siegmund, L., 2016: BGF und NUF: Grundflächen und Raumflächen nach DIN 277. In: Deutsches Architektenblatt, 03.05.2016, Zugriff: <https://www.dabonline.de/normen/bgf-nuf-din-277-flaechenberechnung-geschossflaeche-berechnung-grundflaeche-nutzflaeche/> [abgerufen am 11.03.2024].

Heinrich, M. A., 2019: Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau – Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham. Dissertation an der TU München. Zugriff:

Hertwich, E. G. (2021). Intersectoral environmental assessment of the energy transition. Environmental Research Letters*, 16(4), 045012.

Hollberg, A., 2017: A parametric method for building design optimization based on Life Cycle Assessment. Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar. bauhaus.ifex research series. Zugriff: <https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet.3800>

IWU Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.) (2013): Energieeffiziente und klimaneutrale Quartiere (EQ), Darmstadt. Zugriff: <https://www.iwu.de/research/gebaeudebestand/eq/>

IWU Institut Wohnen und Umwelt (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterte Auflage. Autoren: Tobias Loga, Britta Stein, Nikolaus Diefenbach, Rolf Born. Darmstadt. Zugriff: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcopes/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf

Jansen, F., 2019: Zertifizierung von Quartieren: Auf Nachhaltigkeit geprüft. QUARTIER Ausgabe 3.2019. Zugriff: <https://www.magazin-quartier.de/article/zertifizierung-von-quartieren-auf-nachhaltigkeit-geprueft/#4>

Kalusche, W., 2023: Anteil der Wohnfläche an der Gesamtfläche von Mehrfamilienhäusern. BKL. Stuttgart. Zugriff: <https://www.dabonline.de/2023/05/02/wie-gross-was-gehoert-zu-wohnflaeche-mehrfamilienhaeuser-wfl-bgf-nuf/> [abgerufen am 21.03.2025].

Keller, U. / Kluge, S., 2010: Vom Einzelfall zum Typus. Fallvergleich und Fallkontrastierung in der qualitativen Sozialforschung, Wiesbaden

Klauß, S.; Kirchhof, W. (2010): Altbaukonstruktionen - Materialien und U-Werte im Gebäudebestand. Baustoffe und Bauweisen mit regionalem Bezug. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag

- Koch, A.;** Schmelcher, S.; Sternkopf, T.; Sandrock, M.; Landsberg, F.; Keßeler, J.; Jaeschke, N.; Möhring, P., 2023: Vernetzte Wärmeversorgung in Bestandsquartieren: Handlungsstrategien und Anwendungsfälle für die Initiierung, Planung und Umsetzung vor Ort. Herausgeber: Deutsche Energie-Agentur. Berlin.
- Köck, B.,** et al., 2023. Automation of Life Cycle Assessment. A Critical Review focus-ing on LCI. International Journal of Life Cycle Assessment, 28(6), 1240–1260
- König, H.;** Kohler, N.; Kreissig, J.; Lützkendorf, T., 2009: Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung. Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge. Institut für internationale Architektur-Dokumentation. München
- König, H.,** 2017: Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden. Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten. Endbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt. Zugriff: <https://www.lbb-bayern.de/fileadmin/quicklinks/Quick-Link-Nr-98300000-LfU-Inhalt-Lebenszyklusanalyse.pdf>
- Kohler, N.,** 1998: Stand der Ökobilanzierung von Gebäuden und Gebäudebeständen. Ifib – Institut für Industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe
- Kohler, N.,** 2002: Die Ressourcenfrage. Nachhaltigkeit im Wohnungsbau. Wüstenrot Stiftung (Hrsg.) Wohnbauten in Deutschland. Krämer Verlag, Stuttgart, 2002, 158-179
- Kolbitsch, A.;** Stalf-Lenhardt, M.; Kropik, A.; Prestros, L., 2008: Studie über Wirtschaftlichkeitsparameter und einen ökonomischen Planungsfaktor für geförderte Wohnbauprojekte in Wien. Zugriff: <https://www.wko.at/oe/gewerbe-handwerk/bau/langfassung-studie-.pdf> [abgerufen am 21.03.2025].
- Korda, M.** (Hrsg.), 2005: Städtebau. Technische Grundlagen mit 131 Tabellen. 5. Auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden.
- Kuhn, A.;** Knecht, K.; Schultheiss, M., 2023: Untersuchung von CO2-Emissionen von Erdbauarbeiten, Baugrubensicherungen und Tiefgründungen bei der Erstellung von Untergeschossen. Zugriff: <https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/web/de/aktuell/publikationen/2023/studien-netto-null/untersuchung-co2-emissionen-studie.pdf> [abgerufen am 21.03.2025].
- LCA Online,** 2024: LCA Online. Die Online-Software für Gebäude-Ökobilanzen. Zugriff: <https://lca-online.com> [abgerufen am 23.08.2024].
- Lang, Werner;** Schneider, Patricia (2017): Gemeinschaftlich nachhaltig bauen. Forschungsbericht der ökologischen Untersuchung des genossenschaftlichen Wohnungsbauprojektes wagnisART. Hg. v. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern für Bau und Verkehr und wagnis eG. Zugriff: https://webarchiv.typo3.tum.de/AR/fak-ar/fileadmin/w00bfl/www/02_Aktuell/04_Publikationen/01_Buecher/Gemeinschaftlich_Nachhaltig_Bauen.pdf
- Lenz, Katrin;** Henzler, Kristina (2024): Ökobilanzmodul für den Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere (District ECA) Erstellt im Verbundvorhaben STADTQUARTIER 2050. Zugriff: https://www.stadtquartier2050.de/images/D5_4_1_Stadtquartier_2050_LC_Modul_Handbuch.pdf
- Lichtensteiger, T.** (Hrsg.), 1998: Ressourcen im Bau. Aspekte einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung im Bauwesen, Zürich
- Lichtensteiger, T.** (Hrsg.), 2006: Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme. Ein Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten, Zürich
- Loga, T.;** Diefenbach, N.; Knissel, J., 2005: Entwicklung eines Flächenschätzverfahrens zur Abschätzung von Bauteilflächen als Grundlage für die energetische Bewertung von Wohngebäuden. Bauphysik, 27 (2): 102–116. Zugriff: DOI: 10.1002/bapi.200590017.
- Lohse, L.;** Maas, A.; Vukadinovic, M.; Klauß, S., 2025: Online-Datenbank Altbauatlas: Fortschreibung der Deutschlandkarte für Altbaumaterialien und -konstruktionen. BBSR-Online-Publikation 17/2025, Bonn. Zugriff: <https://doi.org/10.58007/703v-8j53>

- Lützkendorf, Thomas** (2000): Beiträge zur Umsetzung von Prinzipien einer nachhaltigen Entwicklung im Baubereich - zur Zukunftsfähigkeit und Zukunftsverträglichkeit von Bauwerken.
- Mahler, B. et al.**, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2018: Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus, Abschlussbericht, Dessau-Roßlau.
- Martínez-Ramón, N.**, et al., 2024. Frameworks for the application of machine learning in LCA. *Environmental Modelling & Software*, 171, 105711.
- Misselwitz, P. / Rieniets, T.**, 2006: *City of Collision – Jerusalem and the Principles of Conflict Urbanism*, Basel
- Müller, A.; Koert, J.**, 2022: E4Q - Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere. Ergebnisbroschüre. Zugriff: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/2022_IWU-TUD_MuellerEtKoert_E4Q-Ergebnisbroschuere.pdf
- Mueller-Haagen, I.**, Simonsen, J., Többen, L. (Hrsg.): *Die DNA der Stadt. Ein Atlas urbaner Strukturen in Deutschland*, Mainz (2014)
- Müller-Wenk, R.**: Ökologische Buchhaltung - Eine Einführung, In: Seidel E., Strebel H. (Hrsg.) *Umwelt und Ökonomie*. Wiesbaden (1991)
- Nagler, F.; Jarmer, T.; Niemann, A.; Cruel, A.**, 2019: *Einfach Bauen - Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen - Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion*. München.
- Nytsch-Geusen, C.**; Kaul, W.; Wehage, P.; Färber, M., 2016: Nachhaltige und energieeffiziente Bestandsentwicklung von Stadtquartieren – Entwicklung eines Analyse- und Planungstools zur energetischen Bewertung und Sanierung von Stadtquartieren (Open eQuarter). Endbericht eines Forschungsprojekts gefördert mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des BBSR. Zugriff: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/16069021760.pdf>
- Pestel-Institut**, 2024: *Bauen und Wohnen 2024 in Deutschland*. Zugriff: <https://mieterbund.de/app/uploads/2024/01/Bauen-und-Wohnen-im-Jahr-2024.pdf>. [abgerufen am 31.03.2025].
- Piatek, M.**, 2021: *Die CO2 neutrale Baustelle – Chancen und Herausforderungen*. Zugriff: <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/18996/1/Piatek%20Maximilian%20-%202021%20-%20Die%20CO2%20neutrale%20Baustelle%20-%20Chancen%20und...pdf> [abgerufen am 21.03.2025].
- Popowicz, M.**, et al., 2025. Digital technologies for LCA: Review and framework for AI, IoT, and Big Data integration. *Resources, Conservation and Recycling*, 210, 107252.
- Prytula, M.**, 2011: *Ein integrales Energie- und Stoffstrommodell als Grundlage zur Bewertung einer nachhaltigen Entwicklung urbaner Systeme*. Dissertation an der TU Berlin, Universitätsverlag der TU Berlin. Zugriff: <https://depositonce.tu-berlin.de/items/17e3429c-8b6c-4a34-837e-794e8570b008>
- Püstow, M.; Göhlert, T.; Gielen, J.; Tenner, J.; Pawelczyk, E.**, 2023: Klimaverträglich bauen mit einem Schattenpreis für CO2 Emissionen. Unter Mitarbeit von Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. Hg. v. KPMG Law. KPMG. Zugriff: https://www.re-source.com/wp-content/uploads/2023/12/KPMG-2023-Impulspapier_Klimavertraeglich_Bauen_mit_CO2_Schattenpreis.pdf
- Rademacher, K./ Hermann, A.**, 2021: *Ganzheitliche ökologische Bilanzierung von Verkehrssystemen*. Herausgeber: Friedrich-Naumann-Stiftung.
- Ramesh, T.; Prakash, Ravi; Shukla, K.**, 2010: Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42 (10): 1592–1600. Zugriff: DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.007.
- Reicher, C.**, 2012: *Städtebauliches Entwerfen*, Wiesbaden
- Reiß-Schmidt, S.** 2018: *Innenentwicklung*. In: ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung*. Hannover.

- Rieniets, T.** und **Rosenberger, J.**, 2022 : Virtuelle Stadterkundung. Lehr- und Vermittlungsprojekt, gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Kultur und Wissenschaft
- Rid, W.;** **Wolpensinger, H.**, 2025 (im Erscheinen): ÖZW - Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse nachhaltiger Quartiere ab dem Jahr 2000. Zugriff: <https://greenup.one/studie-oekonomie-des-oekologischen-wohnungsbaus/> [abgerufen am 20.03.2025].
- Romeiko, X. X.** et al., 2023. A review of machine learning applications in life cycle assessment. *Environmental Modelling & Software*, 159, 105632.
- Roth, U.** et al., 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau Bonn
- Rubli, S.;** **d'Epinay, A. L.;** **Nager, P.**, 2014: Ressourcenstrategie „Bauwerk Stadt Zürich“. Von der Modellierung des Bauwerks zur ressourcenschonenden Bewirtschaftung der mineralischen Baustoffe. *Müll und Abfall* 2014, 10-14, 547-555.
- Salati, M. ;** **Costa, A. A. ;** **Silvestre, J. D.**, 2025: A Comprehensive Review of Dynamic Life Cycle Assessment for Buildings: Exploring Key Processes and Methodologies. *Sustainability* 2025, 17(1), 159; Zugriff: <https://doi.org/10.3390/su17010159>
- Schiller, G.**, 2004: Siedlungsentwicklung und Infrastrukturaufwendungen. In *Bauökologie - Wissenschaft nachhaltigen Bauens*. Zugriff: https://www2.ioer.de/recherche/pdf/2004_schiller_siedlungsentwicklung.pdf [abgerufen am 21.03.2023].
- Schnürch, D.;** **Haslauer, E.;** **Castelazzi, B.;** **Prinz, T.**, 2014: MORECO Siedlungsrechner – Planungstool zur Abschätzung mobilitätsbezogener Folgekosten im Wohnbau. Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg (AGIT 2014 - Geospatial innovation for society ; vom 2. bis. 4 Juli 2014). Berlin.
- Schrade, J. ;** **Erhorn, H. ;** **Erhorn-Kluttig, H.**, 2020: Entwicklung eines klimaneutralen Versorgungskonzepts für das Bürgerhospital Stuttgart. Wissenschaftliches Hintergrunddokument erstellt im Verbundvorhaben STADTQUARTIER 2050. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart. Zugriff: https://www.stadtquartier2050.de/images/M².1.1_Wissenschaftliches_Hintergrunddokument_Energiekonzept_B%C3%BCrgerhospital_14_08_20.pdf
- Schrade, J.;** **Illner, M.;** **Erhorn-Kluttig, H.;** **Erhorn, H.**, 2022: Leitfaden für die Entwicklung von klimaneutralen Energieversorgungskonzepten für Wohnquartiere. STADTQUARTIER 2050. Stuttgart. Zugriff: https://www.stadtquartier2050.de/images/D3_2_1_LeitfadenKlimaneutraleQuartiere_final.pdf [abgerufen am 26.07.2024].
- Schuchardt, R.**, 2006: Primärenergetische Analyse der Infrastruktur von Wohnsiedlungen. Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum. Zugriff: <https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1174/file/diss.pdf>
- Slavkovic, K. /** **Stephan, A.**, 2025: Dynamic life cycle assessment of buildings and building stocks – A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 212 (2025) 115262. Zugriff: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115262>
- Sodeur, W.** (1974): Empirische Verfahren zur Klassifikation. Stuttgart
- Sohn, J.;** **Kalbar, P.;** **Goldstein, B.;** **Birkved, M.**, 2020: Defining Temporally Dynamic Life Cycle Assessment: A Review. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16 (3): 314–323. DOI: 10.1002/ieam.4235.
- Spreng, D.**, 1994: Graue Energie, Hochschulverlag Zürich / B.G. Teubner Stuttgart/Leipzig
- Stadt Zürich** (Hrsg.), 2009: Ressourcenstrategie «Bauwerk Stadt Zürich». Materialflüsse und Energiebedarf bis 2050, Zürich. Zugriff: https://www.energie-ressourcen.ch/Downloads/Ressourcenstrategie_Stadt_Zuerich.pdf
- Statistisches Bundesamt** (Destatis), 2021: Pressemitteilung Nr. N 015 vom 25. Februar 2021. Zugriff: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/02/PD21_N015_44.html#:~:text=Pressemitteilung%20Nr.,015%20vom%2025.%20Februar%202021&text=WIES-BADEN%20%E2%80%93%20Wohnen%20und%20Bauen%20stehen,wo%20zuletzt%20die%20

Mehrfamilienh%C3%A4user%20%C3%BCberwogen. [abgerufen am 19.05.2024]

Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022: Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen / Baufertigstellungen. Lange Reihen z. T. ab 1949. Zugriff: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baugenehmigungen-baufertigstellungen-pdf-5311101.pdf?__blob=publicationFile [abgerufen am 12.03.2025].

Statistisches Bundesamt (Destatis), 2024: Haushalte nach Haushaltsgröße und Haushaltsmitgliedern nach Bundesländern im Jahr 2023. Zugriff: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Tabellen/1-2-privathaushalte-bundeslaender.html> [abgerufen am 19.05.2024].

Statistisches Bundesamt (Destatis): Startseite. Zugriff: https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html [abgerufen am 17.07.2024].

Statistisches Bundesamt (Destatis), 2025: Anzahl der Einfamilienhäuser in Deutschland in den Jahren von 2001 bis 2023. Veröffentlicht von K. Scholle. Zugriff: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/39010/umfrage/bestand-der-einfamilienhaeuser-in-deutschland-seit-2000/> [abgerufen am 11.08.2025].

Steinort, T. M., 2025: Energiesystemmodellierung auf Basis energetischer Stadtraumtypen. Bachelorarbeit an der FH Münster. Zugriff: https://www.hb.fh-muenster.de/opus4/files/18709/BA_Steinort_Energiesystemmodellierung.pdf

Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A.; Henning, H., 2020: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Herausgeber: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE. Freiburg. Zugriff: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf> [abgerufen am 20.09.2024].

Su, S.; Li, X.; Zhu, Y.; Lin, B., 2017: Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Energy and Buildings* 149 (2017) 310–320. Zugriff: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.042>

Tröger, E. (Autor), Eberle, D. (Herausgeber), 2015: Dichte Atmosphäre: Über die bauliche Dichte und ihre Bedingungen in der mitteleuropäischen Stadt. Birkhäuser Verlag, Basel.

Tubbesing, M., Lampugnani V. M., Stühlinger, H. (Hrsg.), 2018: Atlas zum Städtebau. 2 Bände. Band 1: Plätze Band 2: Straßen. Hirmer Verlag

Umweltbundesamt, 2024a: Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Kraftwerke> [abgerufen am 20.09.2024].

Umweltbundesamt, 2024b: Entwicklung der spezifischen Treibhausgas- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2023. CLIMATE CHANGE 23/2024. Zugriff: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/23_2024_cc_strommix_11_2024.pdf [abgerufen am 20.09.2024].

Unterfrauner, F., 2023: So planen Sie Ihre Elektroinstallation richtig. Zugriff: <https://www.drklein.de/elektroinstallation-planen.html> [abgerufen am 15.08.2024].

Vujicic, D., 2020: Verhältnis der Nutzungsfläche (NUF) zur Brutto-Grundfläche (BGF). Zugriff: <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/15291/2/Vujicic%20Dragan%20-%202020%20-%20Das%20Verhaeltnis%20der%20Nutzungsflaeche%20zu...pdf>

Vukadinovic, M., 2017: Passivhaus Parklogen München-Schwabing. Neubau eines Wohngebäudes mit 44 Wohnungen und einer Tiefgarage. Zugriff: https://passivehouse-database.org/#d_5347 [abgerufen am 19.09.2024].

WECOBIS, o.J.: Grundlage der Ökobilanz. Herausgeber: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)/Bayerische Architektenkammer (ByAK). Zugriff: <https://www.wecobis.de/en/service/sonderthemen-info/gesamttext-oekobilanz-zwischen-den-zeilen-info/grundlage-der-oekobilanz.html> [abgerufen am 21.03.2025].

Wegener, B.; Fedkenheuer, M.; Drexler, H.; Schupp, L., 2024: Funktionswandel des Wohnens. Bestandsaufnahme der aktuellen Wohnpraxis mit dem Ziel der Projektion zukünftigen Wohnbedarfs. BBSR-Online-Publikation 15/2024, Bonn. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2024/bbsr-online-15-2024-dl.pdf> [abgerufen am 21.03.2025].

Weidner, S., 2020: Grundlagen für die Planung von ressourcenminimalen urbanen Strukturen. Universität Stuttgart. Zugriff: <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstreams/303556f7-c2bf-498f-8e28-160c92006f43/download>

Wellpott, E.; Bohne, D., 2006: Technischer Ausbau von Gebäuden. 9. Auflage. Stuttgart.

Yoon, H.-J. (2025): Wege zum klimaneutralen Gebäudebestand. Eine ganzheitliche Untersuchung der Treibhausgas-Reduktionspotenziale von lebenszyklusorientierten Gebäudesanierungsmaßnahmen im Rahmen einer energetischen Quartierssanierung. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt. Zugriff: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/29455/1/Dissertation_Yoon_Hee_Jung.pdf

ZERSiedelt, 2014: Hintergrund zur Berechnung der Grauen Energie im Wohnbau. Zugriff: <https://www.zersiedelt.at/graue-energie-rechner-wohnbau/graue-energie-siedlungspolitik-raumplanung.php> [abgerufen am 21.03.2025].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spezifisches erschließungsbedingtes Stofflager und Geschossflächendichte. Quelle: Schiller, 2004: Siedlungsentwicklung und Infrastrukturaufwendungen, S.5	15
Abbildung 2: Spezifisches Stofflager von Wohngebäuden und Erschließungsanlagen. Quelle: Schiller, 2004: Siedlungsentwicklung und Infrastrukturaufwendungen, S.6	16
Abbildung 3: Erschließungs- und Folgekosten für Straße, Kanal, Trinkwasser und Strom pro Wohneinheit (WE) bei mittlerem Kostenniveau von 2017. Quelle: Bundesstiftung Baukultur, 2018, S.24.	16
Abbildung 4: Systemgrenzen und Teilsysteme für die Erstellung einer Quartiersökobilanz	33
Abbildung 5: Übersicht zur Vorgehensweise und der Arbeitsschritte	36
Abbildung 6: Konzeptmodell zur Unterscheidung der Teilsysteme einer Siedlung mit ihren funktionalen, räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen	37
Abbildung 7: Zentrale Parameter des Bilanzierungsmodell mit den Unterkategorien der untersuchten Spezifikationen	38
Abbildung 8: Erstellung vergleichbarer Bilanzierungseinheiten durch die Entwicklung von Siedlungssegmenten und idealtypischen Siedlungen	39
Abbildung 9: Verfahren zur Modellentwicklung und vereinfachte Darstellung des Bilanzierungsmodells mit den wichtigsten Systemparametern und weiteren Einflussgrößen	41
Abbildung 10: Darstellung der Eingabe- und Ausgabemaske des Rechentools mit ausgewählten Rechenblättern zur Ermittlung der Mengengerüste und GWP-Berechnung	42
Abbildung 11: Lage der erfassten Siedlungen in Deutschland	47
Abbildung 12: Verteilung der untersuchten Projekte nach Bundesländern	50
Abbildung 13: Anzahl Siedlungen pro 1 Mio. Einwohner nach Bundesländern	50
Abbildung 14: Veranschaulichung der Definitionen von unterschiedlichen Erschließungstypen	52
Abbildung 15: Verteilung der untersuchten Projekte nach Stadtgröße sowie nach Entwicklungsstrategie	53
Abbildung 16: Anteilige Verteilung der untersuchten Projekte nach Stadtgröße sowie nach Entwicklungsstrategie	53
Abbildung 17: Verteilung Gebäudetypen	54
Abbildung 18: Verteilung Erschließungstypen	54
Abbildung 19: Verteilung kombinierter Erschließungstypen	54
Abbildung 20: Verteilung der Projekte nach Siedlungsdichten (Quartiers-GFZ)	55
Abbildung 21: Vorkommen der Gebäudetypen in Siedlungen unterschiedlicher Dichte	55
Abbildung 22: Verteilung der Erschließungstypen nach Siedlungsdichte	56
Abbildung 23: Verteilung der Erschließungstypen nach Gebäudetypen	56
Abbildung 24: Die zehn häufigsten Siedlungsstrukturtypen	57
Abbildung 25: Verteilung der drei jeweils am häufigsten vorkommenden Strukturmerkalkombinationen nach Stadtgröße im Vergleich	58
Abbildung 26: Verteilung der drei jeweils am häufigsten vorkommenden Strukturmerkalkombinationen nach Entwicklungsstrategie im Vergleich	58
Abbildung 27: Systematik der Kombination von Siedlungssegmenten zu idealtypischen Siedlungen mit drei unterschiedlichen Erschließungstypen	61
Abbildung 28: Erhobene Gebäudetiefen nach Gebäudetypen	61
Abbildung 29: Größe der erhobenen Gebäudegrundflächen nach Gebäudetypen	62
Abbildung 30: Erhobene Geschossigkeiten nach Gebäudetypen	62
Abbildung 31: Erhobene Dachformen nach Gebäudetypen	63
Abbildung 33: Erhobene Quartiers-GFZs nach Gebäudetypen	65
Abbildung 32: Anteil der erhobenen Verkehrsflächen an der Gesamtfläche (in Prozent) nach Häufigkeit	65
Abbildung 34: Exemplarisches Datenblatt zu einem Siedlungssegmenten mit Siedlungskennwerten	67
Abbildung 35: Matrix Siedlungssegmente: Übersicht zu den 54 Siedlungssegmenten	67
Abbildung 36: Matrix Siedlungstypen: Übersicht über die 54 idealtypischen Siedlungen	68
Abbildung 38: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes nach DIN EN 15804	69
Abbildung 37: Die vier Schritte einer Lebenszyklusanalyse	69
Abbildung 39: Q-LCA Sitemap Parameterverknüpfung - eine diagrammatische Repräsentation der Parameterbeziehungen im Bilanzierungsmodell	72

Abbildung 40: Schematische Übersicht Grundflächen und Raumflächen nach DIN 277-1:2016-01 (Quelle: Heinkelmann, Siegmund 2016)	74
Abbildung 41: Übersicht zum Verfahren für die Berechnung der Flächengrößen, Wohneinheiten und Einwohner der Siedlungssegmente	76
Abbildung 42: Schematische Darstellung des Verlauf eines Trinkwassernetzes (links in blau) und Abwassernetzes (rechts in rot) entlang der Straßen innerhalb einer Siedlung (Schuchardt, 2006, Seite 52 und 56).	82
Abbildung 43: Strombedarf der Haushalte. Durchschnittlicher Jahresstromverbrauch (ohne Heizstrom) je Haushalt nach Haushaltsgrößen (BDEW 2021).	89
Abbildung 44: Entwicklung des CO ₂ -Emissionsfaktors für den deutschen Strommix. Datenquelle: Umweltbundesamt 2024 a, b).	90
Abbildung 45: Auswertung aller 972 Varianten aufsteigend sortiert nach GWP min - max für Flächen-Indikator (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	96
Abbildung 46: Auswertung aller 972 Varianten aufsteigend sortiert von GWP min - max für Personen-Indikator (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO ₂ eq/ Person * a]	97
Abbildung 47: Auswertung aller 972 Varianten sortiert nach Gebäudetypen und aufsteigender Dichtetyp (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	98
Abbildung 48: Auswertung aller 972 Varianten sortiert nach Energiekennwerten (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	99
Abbildung 49: Auswertung aller 162 Varianten sortiert nach Gebäudetypen und aufsteigender Dichtetyp (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	100
Abbildung 50: Auswertung aller 162 Varianten sortiert nach Energiekennwerten (ohne Haushaltsstrom), GWP in kg [CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	101
Abbildung 51: Anteil der Kostengruppen am GWP der Siedlungen im Mittelwert (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	102
Abbildung 52: Verteilung des GWP auf die Kostengruppen differenziert nach den sechs Gebäudetypen im Mittelwert (ohne Haushaltsstrom), GWP in [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	102
Abbildung 53: Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster /15 kWh Heizwärme sortiert nach dem flächenbezogenen GWP min-max.	104
Abbildung 54: Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster /15 kWh Heizwärme, sortiert nach dem personenbezogenen GWP min-max.	105
Abbildung 55: Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster /30 kWh Heizwärme, sortiert nach dem flächenbezogenen GWP min-max.	106
Abbildung 56: Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster /30 kWh Heizwärme, sortiert nach dem personenbezogenen GWP min-max.	107
Abbildung 57: Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster /70 kWh Heizwärme, sortiert nach dem flächenbezogenen GWP min-max.	108
Abbildung 58: Auswertung von 54 Varianten, Holz / Raster /70 kWh Heizwärme, sortiert nach dem personenbezogenen GWP min-max.	109
Abbildung 59: Auswertung von 54 Varianten sortiert nach dem Gebäudetyp, aufsteigend von Einfamilienhaus zu Block / Winkel.	110
Abbildung 60: Auswertung von 54 Varianten sortiert nach dem Siedlungsdichtetyp, aufsteigend gering, mittel, hoch.	111
Abbildung 61: Auswertung von 54 Varianten sortiert nach dem Wärmeversorgungssystem.	112
Abbildung 62: Auswertung von 54 Varianten sortiert aufsteigend nach absoluter städtebaulicher Dichte (GFZ).	113
Abbildung 63: GWP-Gesamt für den Haushaltsstrom in allen 972 Siedlungsvarianten, GWP in [kg CO ₂ eq/m ² NRF * a]	114
Abbildung 64: Gesamt-GWP der Siedlungstypen mit Haushaltsstrom differenziert nach Bebauungstypen, Mittelwerte in [kg CO ₂ eq/m ² NRF*a]	115
Abbildung 65: Gesamt-GWP der Siedlungstypen mit Haushaltsstrom differenziert nach Bebauungstypen, Mittelwerte in [kg CO ₂ eq/Person*a]	115
Abbildung 66: Anteil des Haushaltsstroms am Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/m ² NRF*a] der jeweiligen Bebauungstypen, Mittelwerte in Prozent	115
Abbildung 67: Anteil des Haushaltsstroms am Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] in Prozent) der jeweiligen Bebauungstypen, Mittelwerte in Prozent	115
Abbildung 68: Anteil der Kostengruppen am GWP der sechs Gebäudetypen (inkl. Haushaltsstrom), GWP in kg CO ₂ eq/ [m ² NRF * a]	115

Abbildung 69: Anteil des GWP an den Kostengruppen für die sechs Gebäudetypen (ohne Haushaltsstrom), GWP in $\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}$	115
Abbildung 70: Summenbilanz jährliches GWP des Haushaltsstroms über 50 Jahre (Bilanzgrenze der Ökobilanz) bei statischer und dynamischer Betrachtung des deutschen Stromsystems in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$.	116
Abbildung 71: Auswertung KG 300 Baukonstruktion mit Aushub für alle 972 Siedlungsvarianten. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	117
Abbildung 72: Auswertung KG 500 Erschließung mit Aushub für alle 972 Siedlungsvarianten. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	117
Abbildung 73: Vergleich des flächenbezogenen GWP der Gebäudetypen in Holz- und Massivbauweise (Betrachtung aller Kostengruppen, ohne Haushaltsstrom).	118
Abbildung 74: Vergleich des flächenbezogenen GWP der Gebäudetypen in Holz- und Massivbauweise (nur KG 300, ohne Haushaltsstrom).	118
Abbildung 76: Relativer Anteil der Bauteile am GWP/ $\text{m}^2 \text{ NRF}$ der Kostengruppe 300 im Mittel aller Siedlungsvarianten.	119
Abbildung 75: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/Person} \cdot \text{a}]$ einer Holzbausiedlung im Vergleich zu einer Siedlung in mineralischer Bauweise (in Prozent)	119
Abbildung 77: Auswertung KG 300 (komplett) für alle 486 Siedlungsvarianten in Holzbauweise. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	120
Abbildung 78: Auswertung KG 331 und 334 - Fassade für alle 486 Siedlungsvarianten in Holzbauweise. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	120
Abbildung 79: Auswertung KG 341 - Geschoßdecke für alle 486 Siedlungsvarianten in Holzbauweise. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	120
Abbildung 80: Auswertung KG 300 (komplett) für alle 486 Siedlungsvarianten in mineralischer Bauweise. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	121
Abbildung 81: Auswertung KG 331 und 334 - Fassade für alle 486 Siedlungsvarianten in mineralischer Bauweise. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	121
Abbildung 82: Auswertung KG 341 - Geschoßdecke für alle 486 Siedlungsvarianten in mineralischer Bauweise. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	121
Abbildung 83: Absoluter Anteil der Bauteile der Kostengruppe 300 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	123
Abbildung 84: Relative Anteile der Bauteile der Kostengruppe 300 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in Prozent	123
Abbildung 85: Auswertung der KG 400 Haustechnik inklusive KG 420 Wärmeversorgungssysteme). GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	124
Abbildung 86: Auswertung B6 - Energiebedarf für Wärmeversorgung (ohne gebäudetechnische Systeme). GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	124
Abbildung 87: Auswertung der KG 400 Haustechnik ohne KG 420 Wärmeversorgungssysteme. GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	124
Abbildung 88: Gegenüberstellung des flächenbezogenen GWP im Mittel aller Varianten mit drei verschiedenen Energiekennwerten $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	125
Abbildung 89: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/Person} \cdot \text{a}]$ bei unterschiedlichen Energiekennwerten im Vergleich zu einem Energiekennwert von 70 kWh (in Prozent)	125
Abbildung 90: Gegenüberstellung des flächenbezogenen GWP im Mittel aller Varianten mit drei verschiedenen Wärmeversorgungsarten	125
Abbildung 91: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/Person} \cdot \text{a}]$ bei unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepten im Vergleich zu einer Wärmeversorgung durch Erdgas (in Prozent)	125
Abbildung 92: Ranking der Auswertung des GWP für KG 500 - Erschließung mit Aushub am Beispiel 54 Siedlungsvarianten, Holz / Raster / 15 kWh Heizwärme in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	126
Abbildung 93: Darstellung der zum Ranking in Abbildung 91 korrespondierenden Gebäudetypen.	126
Abbildung 94: Anteil der Bauteile am GWP der Kostengruppe 500 im Mittel aller Siedlungsvarianten in Prozent	127
Abbildung 95: Absoluter Anteil der Bauteile der Kostengruppe 500 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	127
Abbildung 96: Relativer Anteil der Bauteile der Kostengruppe 500 im Mittel der sechs Gebäudetypen am GWP in Prozent	127
Abbildung 97: Verteilung des flächenbezogenen GWP einer häufig vorkommenden Siedlung mit Haushaltsstrom in $[\text{kg CO}_2 \text{ eq/ m}^2 \text{ NRF} \cdot \text{a}]$	129

Abbildung 98: Darstellung der städtebaulichen Einflussfaktoren und ihrer Abhängigkeiten	130
Abbildung 99: Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] unterschiedlicher Bebauungstypen nach Einflussfaktoren (Mittelwerte)	132
Abbildung 100: Schematische Verteilung des erzeugten GWP einer Neubausiedlung [kg CO ₂ eq/Person*a] nach Jahren (gruppiert nach Einflussfaktoren; Mittelwerte)	132
Abbildung 101: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] unterschiedlicher Bebauungstypen im Vergleich zu einer Einfamilienhaussiedlung (in Prozent)	133
Abbildung 102: Vergleich des Flächenverbrauchs von 1.000 Personen bei unterschiedlichen Bebauungstypen jeweils mittlerer Dichte	134
Abbildung 103: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] durch die Verringerung der Wohnfläche pro Person (in Prozent)	135
Abbildung 104: Wirkmächtigkeit der Belegungsdichte im Verhältnis zur Wirkmächtigkeit des Energiekennwerts auf das GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] am Beispiel einer Wohnung von 70 m ² (Zeilenbebauung mittlerer Dichte, Massiv, Nahwärme kalt)	135
Abbildung 105: Hüllflächen unterschiedlicher Bebauungstypen pro Person (Mittelwerte, in m ²)	135
Abbildung 106: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] durch höhere Quartiersdichten im Vergleich zu Siedlungen mit einer geringen Dichte (Quartiers-GFZ zwischen 0,2 und 0,5). Zur Berechnung Siedlungsdichte siehe Tabelle 4, S.66	136
Abbildung 107: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] durch eine Bebauung hoher Dichte im Vergleich zu einer Bebauung geringer Dichte, unterteilt in Bebauungstypen (in Prozent).	136
Abbildung 108: Maximal erreichbare GFZ in Abhängigkeit der Geschosse bei Einhaltung der Abstandsflächen von 0,4 H nach Bebauungstyp	136
Abbildung 109: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] durch die Verringerung öffentlicher Erschließungsflächen (in Prozent)	136
Abbildung 110: Öffentliche Verkehrsfläche pro Person nach Bebauungstyp (Mittelwert, in m ²)	137
Abbildung 111: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] durch die Verringerung öffentlicher Erschließungsflächen nach Bebauungstyp (in Prozent)	137
Abbildung 112: GWP [kg CO ₂ eq/Stellplatz*a] unterschiedlicher Stellplatztypen)	137
Abbildung 113: Mittlere Reduktion des Gesamt-GWP [kg CO ₂ eq/Person*a] durch die Verringerung der Anzahl von Tiefgaragenstellplätzen bei Mehrfamilienhäusern im Vergleich zu einem Stellplatz pro Wohneinheit (in Prozent)	138
Abbildung 114: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP [kg CO ₂ eq/m ² NRF], hier Variante Nr. 499: Kalte Nahwärme	139
Abbildung 115: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP [kg CO ₂ eq/m ² NRF], hier Variante Nr. 500: Luft-Wasser-Wärmepumpe	139
Abbildung 116: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP [kg CO ₂ eq/m ² NRF], hier Variante Nr. 501: Erdgas	139
Abbildung 117: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren GWP vereinfacht, dynamisch [kg CO ₂ eq/m ² NRF], hier Variante Nr. 499: Kalte Nahwärme	140
Abbildung 118: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren vereinfacht, dynamisch GWP [kg CO ₂ eq/m ² NRF], hier Variante Nr. 500: Luft-Wasser-Wärmepumpe	140
Abbildung 119: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen, unterteilt nach Kostengruppen und Jahren vereinfacht, dynamisch GWP [kg CO ₂ eq/m ² NRF], hier Variante Nr. 501: Erdgas	140
Abbildung 120: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen GWP statisch [kg CO ₂ eq/m ² NRF].	141
Abbildung 121: Vergleich der Gesamt-GWP unterschiedlicher Wärmeversorgungstypen GWP vereinfacht dynamisch [kg CO ₂ eq/m ² NRF].	141
Abbildung 122: Lageplan der untersuchten Realsiedlung mit sechs unterscheidbaren Teilbereichen	142
Abbildung 123: Anteile des GWP differenziert nach Kostengruppen am absoluten GWP der Siedlung (oben), sowie jeweils für die sechs vorab definierten Teilbereiche (unten) (ohne Haushaltsstrom)	144
Abbildung 124: Absoluter GWP der sechs Siedlungsbereiche (ohne Haushaltsstrom) in [kg CO ₂ eq/ m ² * a]	145
Abbildung 125: NRF-flächenbezogener GWP der sechs Siedlungsbereiche (ohne Haushaltsstrom) in [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a]	145
Abbildung 126: Personenbezogenes GWP der sechs Siedlungsbereiche (ohne Haushaltsstrom) in [kg CO ₂ eq/ Person * a]	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die erfassten Projekte (in alphabetischer Reihenfolge)	48
Tabelle 2: Übersicht Flächenwerte und Geschossigkeiten nach Gebäudetypen	64
Tabelle 3: Übersicht Straßenlänge und Verkehrsfläche nach Erschließungstyp auf Siedlungsebene (6 ha)	64
Tabelle 4: Übersicht zu den Siedlungsdichten innerhalb der gebildeten Segmente. Bandbreiten innerhalb der Dichtegruppen stehen in Abhängigkeit zum Erschließungstyp	66
Tabelle 5: Übersicht zu den für die Modellierung gewählten Wohnungsgrößen und Belegungsdichten	66
Tabelle 6: Überblick zum GWP für Erdaushub aus verschiedenen Literaturquellen in [kg CO ₂ eq/m ³ *a]	78
Tabelle 7: Definition der Wandkonstruktionen für Bilanzierung	79
Tabelle 8: Haushaltsgößen und Strombedarf pro Haushalt und Jahr (Referenzjahr 2022). Datenquellen: (1) Umweltbundesamt 2024 a, b ; (2) BDEW 2021	89
Tabelle 9 : Entwicklung des durchschnittlichen GWP/ kWh * Jahr * Person sowie des GWP/ kWh * Jahr * m ² Nutzfläche (bei einer Bezugsfläche von 47,4 m ² Nutzfläche/Person) seit 1990. Datenquelle: Umweltbundesamt 2024 a, b	90
Tabelle 10: NRF-flächenbezogener GWP aller 972 Varianten [kg CO ₂ eq/ m ² NRF * a] (Maximalwert in rot, Minimalwert in grün)	94
Tabelle 11: Personenbezogener GWP aller 972 Varianten [kg CO ₂ -eq/ Person * a] (Maximalwert in rot, Minimalwert in grün)	95
Tabelle 12: Festlegung der Flächen und Parameter von den sechs Siedlungsbereichen in der Eingabemaske des Q-LCA Tools	143
Tabelle 13: Darstellung der Teilbereiche im Q-LCA Tool	144
Tabelle 14: Darstellung der Interview-Partner in chronologischer Reihenfolge	166

Anhang

Nachweise zur Ermittlung der baukonstruktiven und gebäudetechnischen Kennwerte gegliedert nach Kostengruppen (KG) gemäß DIN 276.

KG 300 - Holzbauweise

KG 300 - Massivbauweise

KG 400 - Gebäudetechnik

KG 410 - Abwasser-, Wasser- und Gasanlagen

KG 420 - Wärmeversorgungsanlagen

KG 430 - Raumluftechnische Anlagen

KG 440 - Elektrische Anlagen

KG 500 - Außenanlagen und Freiflächen

KG 510 - Erdbau

KG 530 - Oberbau, Deckschichten

KG 540 - Baukonstruktionen

Annahmen zu Mengen von Tiefgaragen und Kellern

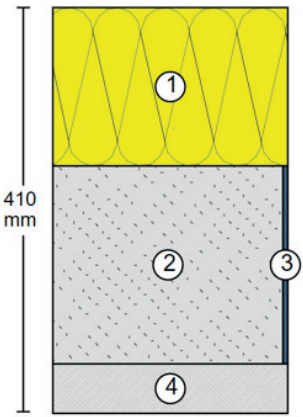
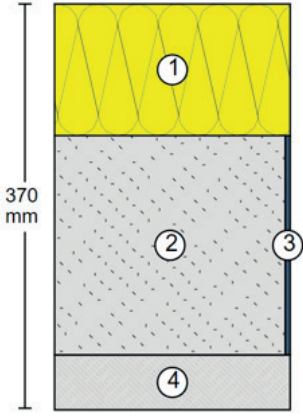
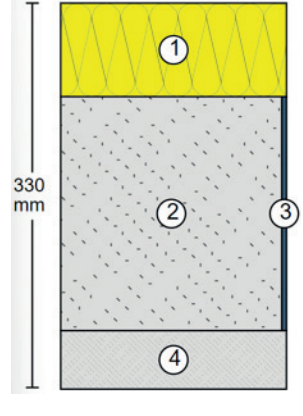
KG 550 - Technische Anlagen

Weitere Annahmen und Herleitungen von Parametern:

Annahmen Fensterflächen

Herleitung Gebäudeenergiekennwerte

KG 300 - Holzbauweise

Nr./ Name	Energiekennwert	Geschossigkeit	GWP	Annahmen
01 Bodenplatte	15 kWh	hoch/ gering	2,21 kg CO ₂ eq/m ² *a	Die Bodenplatte entspricht der Grundfläche. Die Dämmung der untersten Geschossdecke wird als Dämmung der Bodenplatte angerechnet, obwohl die Dämmung bei Gebäuden mit (unbeheizten) Kellern eigentlich unter der Kellerdecke sein müsste. Die Anrechnung bei der Bodenplatte ist jedoch rechnerisch besser umsetzbar.
 410 mm ① Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS), 160,00mm ② Transportbeton C25/30, 200,00mm ③ Bewehrungsstahl, 200,00mm ④ Transportbeton C20/25, 50,00mm				
02	30 kWh	hoch/ gering	2,04 kg CO ₂ eq/m ² *a	
 370 mm ① Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS), 120,00mm ② Transportbeton C25/30, 200,00mm ③ Bewehrungsstahl, 200,00mm ④ Transportbeton C20/25, 50,00mm				
03	70 kWh	hoch/ gering	1,87 kg CO ₂ eq/m ² *a	
 330 mm ① Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS), 80,00mm ② Transportbeton C25/30, 200,00mm ③ Bewehrungsstahl, 200,00mm ④ Transportbeton C20/25, 50,00mm				

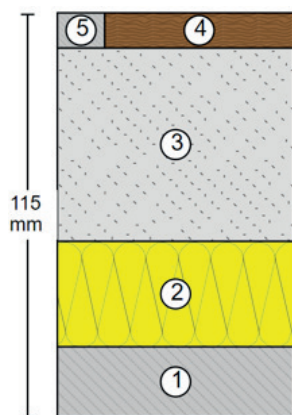
04 Boden-
beläge

15/30/70 kWh

hoch/
gering0,75 kg CO₂ eq/m²*a

Die Fläche des Bodenbelags berechnet sich aus der NRF abzüglich des Kellerbodens - weil dort kein Belag angenommen wird - und der Treppenausschnitte.

Parkett (80%) und Fliesen (20%) werden anteilig angerechnet, um die unterschiedlichen Oberflächen innerhalb einer Wohneinheit abzubilden.



- ① Perlite 0-1, 20,00mm
- ② EPS-Hartschaum (Rohdichte 20 kg/m³), 30,00mm
- ③ Zementestrich, 55,00mm
- ④ Massivholzparkett (Durchschnitt DE), 10,00mm
- ⑤ Italienische Keramikfliesen, 10,00mm

Außenwände

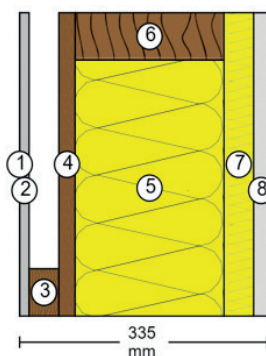
05

15 kWh

gering

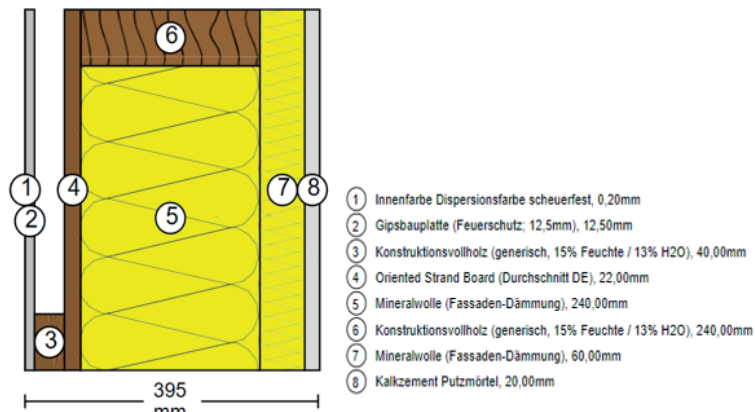
0,97 kg CO₂ eq/m²*a

Die Außenwandfläche entspricht der gemessenen Fassadenflächen der statistisch generierten Gebäude abzüglich der Fenster- und Türflächen. Die Fassadenflächen unterscheiden sich zwischen Gebäudetypen und unterschiedlichen Dichten. Bei hochgeschossigen Gebäuden (>2,5 Geschosse) ist ein stärkerer Wandaufbau notwendig als bei niedrigen Gebäuden (≤ 2,5 Geschosse). Außerdem hängt die Dämmstärke vom zu erreichenden U-Wert (und damit kWh) ab. Es wird eine Bruttogeschosshöhe von 3,00 m angenommen. Diese setzt sich aus 2,70 m lichter Höhe zuzüglich der Geschossdecke zusammen. Holzaußenwände sind in Holzrahmenbauweise gefertigt, während im Massivbau Kalksandsteinmauerwerk angenommen wurde.

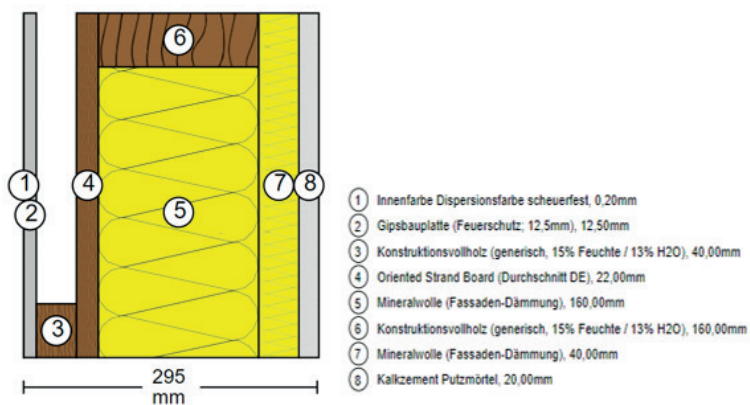


- ① Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest, 0,20mm
- ② Gipsbauplatte (Feuerschutz), 12,5mm
- ③ Konstruktionsvollholz (generisch, 15% Feuchte / 13% H₂O), 40,00mm
- ④ Oriented Strand Board (Durchschnitt DE), 22,00mm
- ⑤ Mineralwolle (Fassaden-Dämmung), 200,00mm
- ⑥ Konstruktionsvollholz (generisch, 15% Feuchte / 13% H₂O), 200,00mm
- ⑦ Mineralwolle (Fassaden-Dämmung), 40,00mm
- ⑧ Kalkzement Putzmörtel, 20,00mm

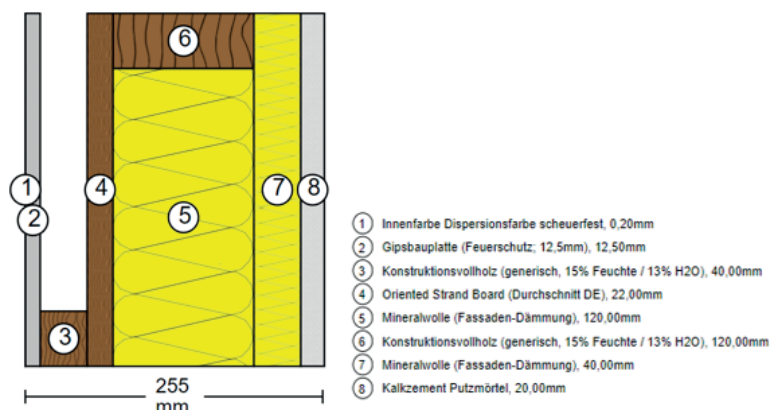
06 15 kWh hoch 1,09 kg CO₂ eq/m²*a



07 30 kWh gering/
hoch 0,88 kg CO₂ eq/m²*a



08 70 kWh gering/
hoch 0,79 kg CO₂ eq/m²*a



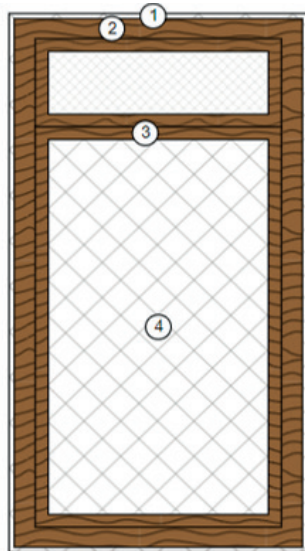
Außentüren und Außenfenster

09 Außentüren und Wohnungseingangstüren

15/30/70 kWh

gering/
hoch

8,4 kgCO₂eq/Stk*a



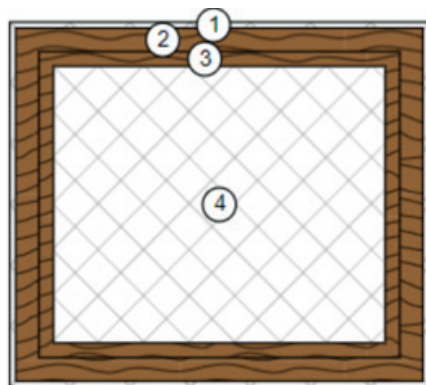
- ① Anschlussfuge: Elastomer Fugenbänder, Polyurethan
- ② Blendrahmen: Holz-Blendrahmen
- ③ Flügelrahmen: Holz-Flügelrahmen
- ④ Verglasung: Tür - Rubner Türen GmbH - Haustüren aus Holz

10 Fenster

15/30/70 kWh

gering/
hoch

3,17 kg CO₂ eq/m²*a



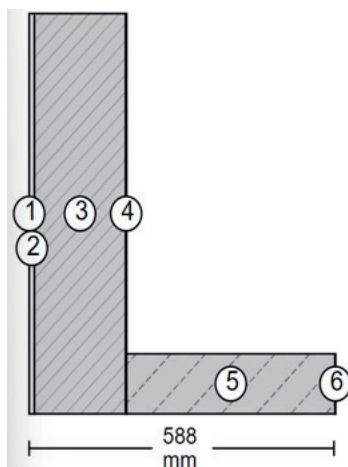
- ① Anschlussfuge: Elastomer Fugenbänder, Polyurethan
- ② Blendrahmen: Holz-Blendrahmen
- ③ Flügelrahmen: Holz-Flügelrahmen
- ④ Verglasung: Dreifachverglasung

11 Kellerwände

15/30/70 kWh

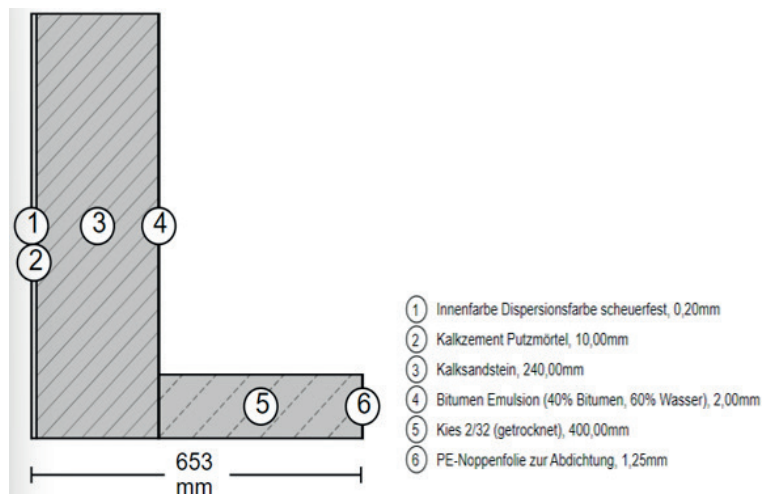
gering

1,43 kg CO₂ eq/m²*a



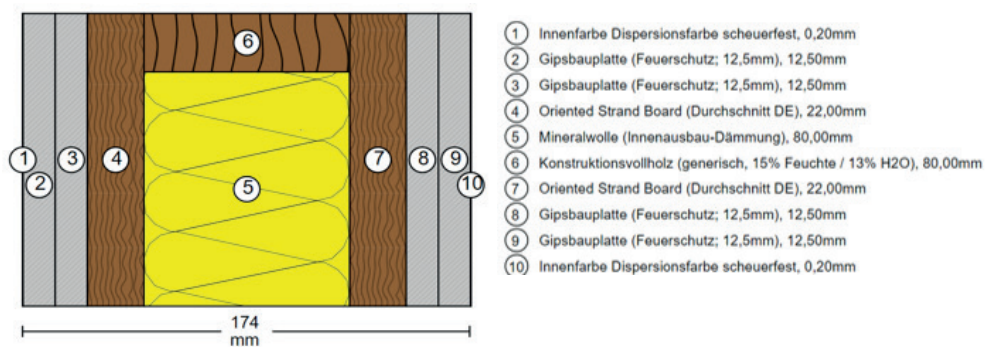
- ① Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest, 0,20mm
- ② Kalkzement Putzmörtel, 10,00mm
- ③ Kalksandstein, 175,00mm
- ④ Bitumen Emulsion (40% Bitumen, 60% Wasser), 2,00mm
- ⑤ Kies 2/32 (getrocknet), 400,00mm
- ⑥ PE-Noppenfolie zur Abdichtung, 1,25mm

12 15/30/70 kWh hoch 1,85 kg CO₂ eq/m²*a

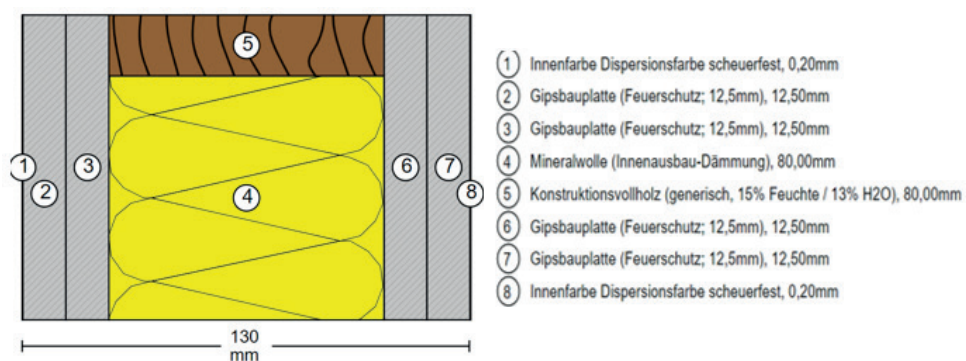


Tragende und nichttragende Wände

13 Tragende Innenwand 15/30/70 kWh gering/hoch 0,8 kg CO₂ eq/m²*a



14 15/30/70 kWh gering/hoch 0,47 kg CO₂ eq/m²*a

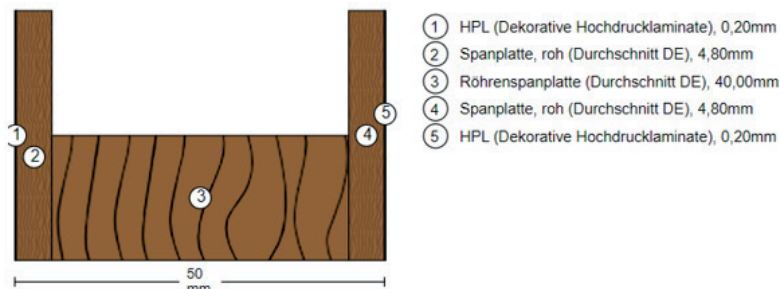


15 Innentüren

15/30/70 kWh

gering/
hoch0,22 kgCO₂ eq/Stk*a

Die Fläche wurde durch die Bemessung der Türen von Realprojekten (Passivhaus-Datenbank) ermittelt. Mit Innentüren sind Türen innerhalb der Wohnung gemeint (exklusive Wohnungstüren). Türflächen werden separat von tragenden und nichttragenden Wänden abgezogen.

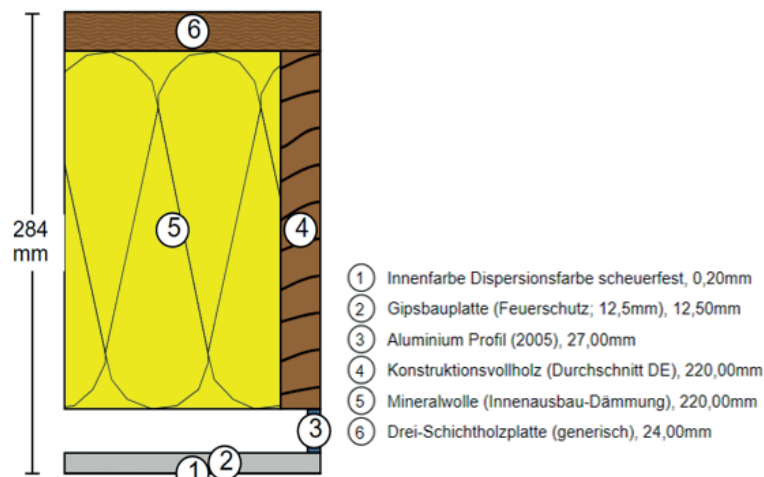


16 Decken

15/30/70 kWh

gering/
hoch1,22 kg CO₂ eq/m²*a

Die Fläche errechnet sich aus der Bodenfläche pro Geschoss abzüglich der Treppenausschnitte. Bei den kleinen Gebäudetypen wird aufgrund der halben Unterkellerung nur die Hälfte der Decke zwischen Keller und EG berechnet.



Treppen aus Holz und Beton

Bei Treppen wird zwischen niedriggeschossigen und hochgeschossigen Gebäuden unterschieden. Niedriggeschossige Gebäude haben immer eine Holztreppe (auch im Massivbau). Hochgeschossige Gebäude haben immer eine Massivtreppe (auch im Holzbau). Bei den Gebäudetypen EFH, DH und PH wird ein zentrales Treppenhaus zur Erschließung der Wohneinheiten angenommen. Bei den Gebäudetypen RH, ZH und MFH werden multiple dezentrale Treppenhäuser zur Erschließung der Wohneinheiten angenommen. Die Treppenzahl wird in Abhängigkeit der Wohneinheitenanzahl und Geschossigkeit definiert. Bei den kleinen Gebäudetypen ist zu berücksichtigen, dass nur jedes zweite Gebäude über einen Keller (mit Treppe) verfügt. Aus Brandschutzgründen kann der Aufzug die Treppe nicht ersetzen. Wenn ein Aufzug vorhanden ist, dann immer in Kombination mit einem ganzen Treppenhaus. Auch ein halbes Geschoss braucht immer eine ganze Treppe.

17

15/30/70 kWh

gering
(Holz)0,59 kgCO₂eq/Stk*a

Name*
Holztreppe

Treppentyp
☐ Massivtreppe ☒ Wangentreppe ☐ Mittelholmtreppe

Abmessungen

Laufbreite* m Anzahl Stufen*

Schrittmaß cm Steigung* cm Auftritt* cm

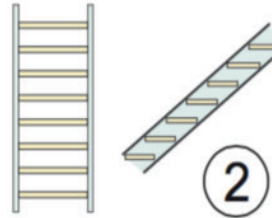
Trittstufe Dicke* cm Tiefe* cm

Material*
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)

Setzstufe Dicke cm Höhe cm

Material
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)

Wangentreppen



Konstruktion Wangen

Dicke* cm	Höhe* cm	Länge m	Errechnete Länge m
3	20	5,77	5,77 übernehmen

Anzahl

Material

Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)

18

15/30/70 kWh

hoch
(Beton)10,83 kgCO₂eq/Stk*a

Name*
Massivtreppe

Treppentyp
☒ Massivtreppe ☐ Wangentreppe ☐ Mittelholmtreppe

Abmessungen

Laufbreite* m Anzahl Stufen*

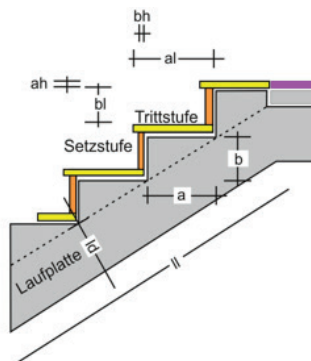
Schrittmaß cm Steigung* cm Auftritt* cm

Trittstufe Dicke* cm Tiefe* cm

Material*
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)

Setzstufe Dicke cm Höhe cm

Material
[auswählen](#)



Konstruktion Laufplatte

Dicke* cm	Länge m	Errechnete Länge m
15	5,77	5,77 übernehmen

Material*

Transportbeton C20/25

Anteil %

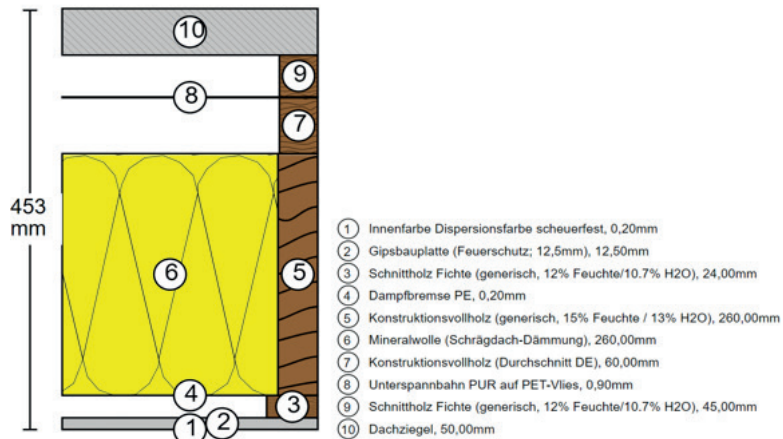
Material

Bewehrungsstahl

Anteil %

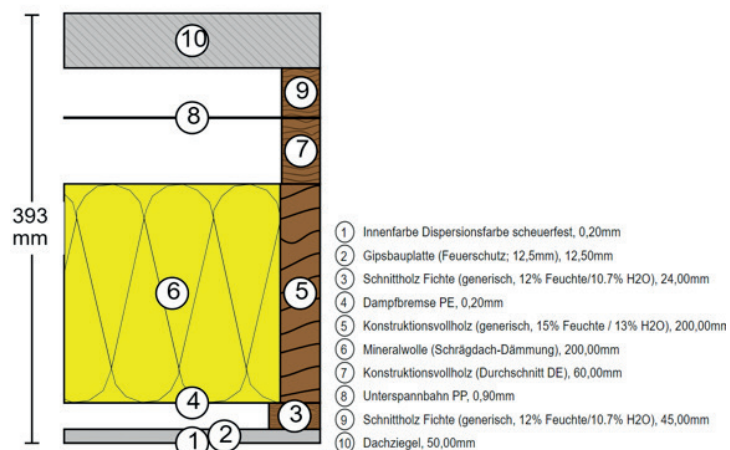
Dachkonstruktionen

19 15 kWh gering 1,54 kg CO₂ eq/m²*a
Satteldach

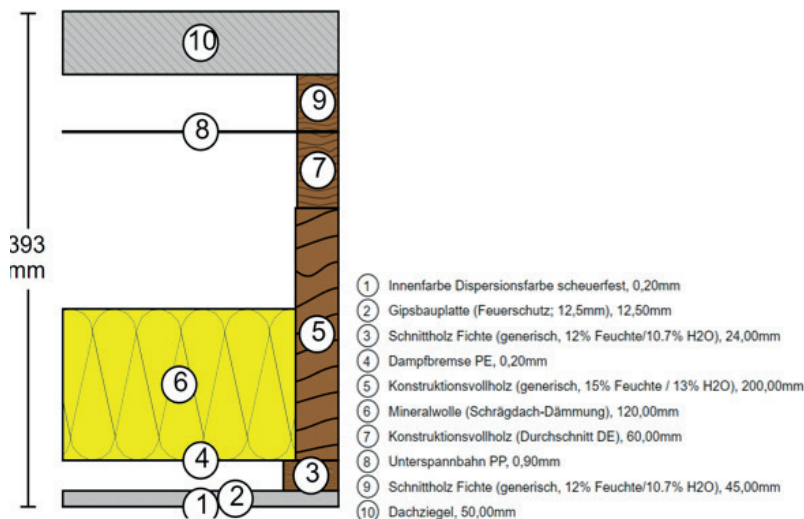


Bei Häusern mit geringer Geschossigkeit wird immer ein Satteldach in Holzbauweise angenommen (auch im Massivbau). Bei Häusern mit hoher Geschossigkeit wird immer ein Flachdach angenommen, wobei hier in Holz-Flachdach und Massiv-Flachdach unterschieden wird. Die Decke des obersten Geschosses ist auch beim Flachdach nicht im Dach verrechnet, sondern separat.

20 30 kWh gering 1,51 kg CO₂ eq/m²*a
Satteldach

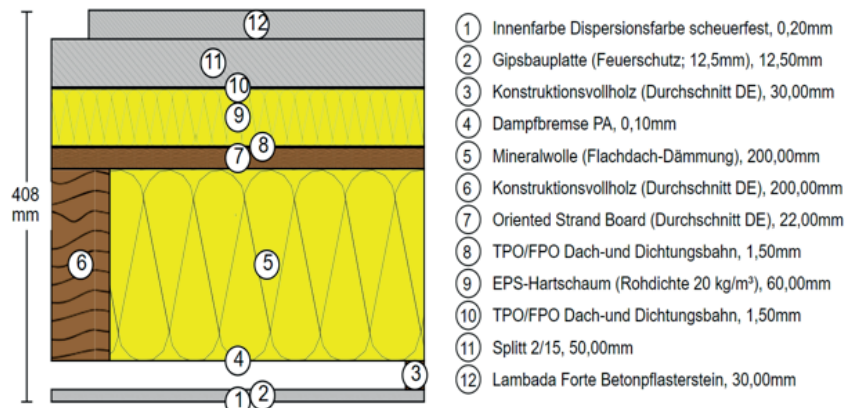


21 70 kWh gering 1,45 kg CO₂ eq/m²*a
Satteldach

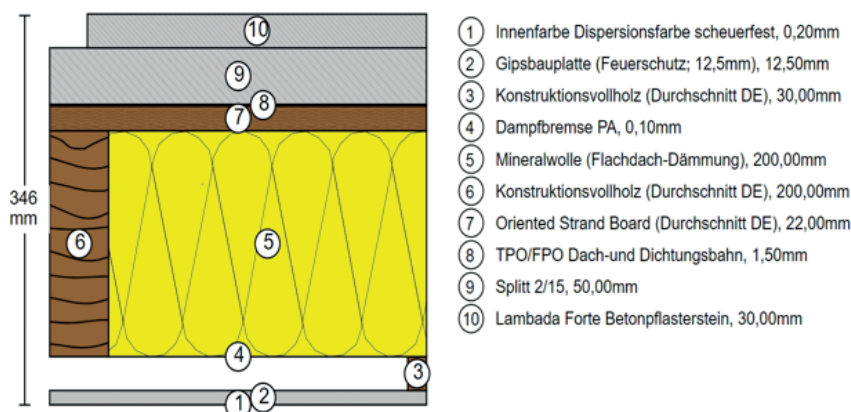


Dachkonstruktionen

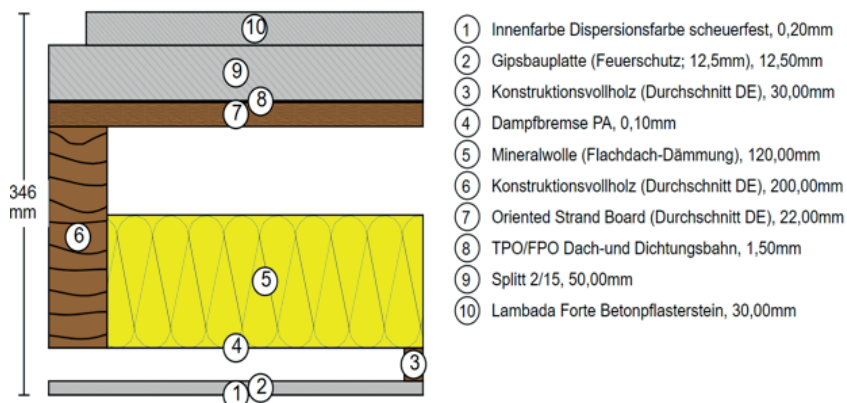
22 15 kWh hoch 1,63 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



23 30 kWh hoch 1,41 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



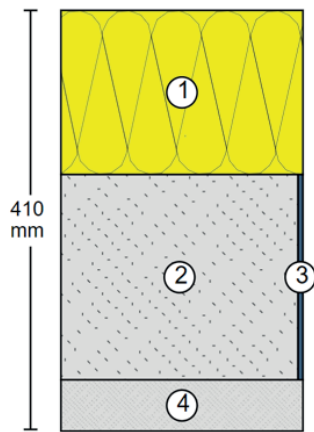
24 70 kWh hoch 1,13 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



KG 300 - Massivbauweise

Bodenplatte

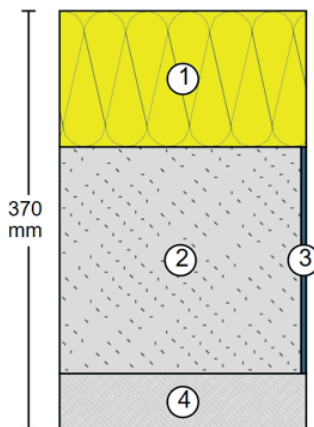
25 15 kWh hoch 2,21 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



- ① Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS), 160,00mm
- ② Transportbeton C25/30, 200,00mm
- ③ Bewehrungsstahl, 200,00mm
- ④ Transportbeton C20/25, 50,00mm

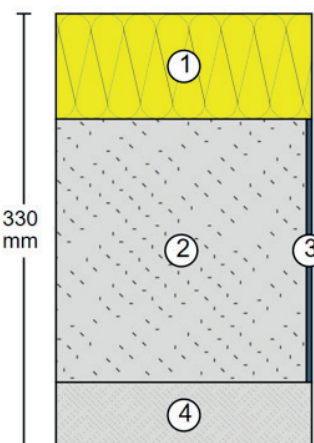
Die Bodenplatte entspricht der Grundfläche. Die Dämmung der untersten Geschossdecke wird als Dämmung der Bodenplatte angerechnet, obwohl die Dämmung bei Gebäuden mit (unbeheizten) Kellern eigentlich unter der Kellerdecke sein müsste. Die Anrechnung bei der Bodenplatte ist jedoch rechnerisch besser umsetzbar.

26 30 kWh hoch 2,04 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



- ① Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS), 120,00mm
- ② Transportbeton C25/30, 200,00mm
- ③ Bewehrungsstahl, 200,00mm
- ④ Transportbeton C20/25, 50,00mm

27 70 kWh hoch 1,87 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



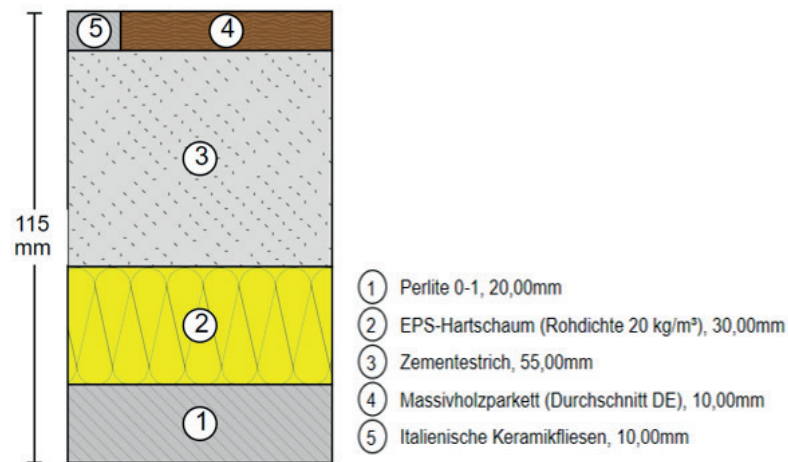
- ① Extrudierter Polystyrol Dämmstoff (XPS), 80,00mm
- ② Transportbeton C25/30, 200,00mm
- ③ Bewehrungsstahl, 200,00mm
- ④ Transportbeton C20/25, 50,00mm

28 Boden- 15/30/70kWh
belag

gering/
hoch

0,75 kg CO₂ eq/m²*a

Die Fläche des Bodenbelags berechnet sich aus der NRF abzüglich des Kellerbodens - weil dort kein Belag angenommen wird - und der Treppenausschnitte.



Parkett (80%) und Fliesen (20%) werden anteilig angerechnet, um die unterschiedlichen Oberflächen innerhalb einer Wohneinheit abzubilden.

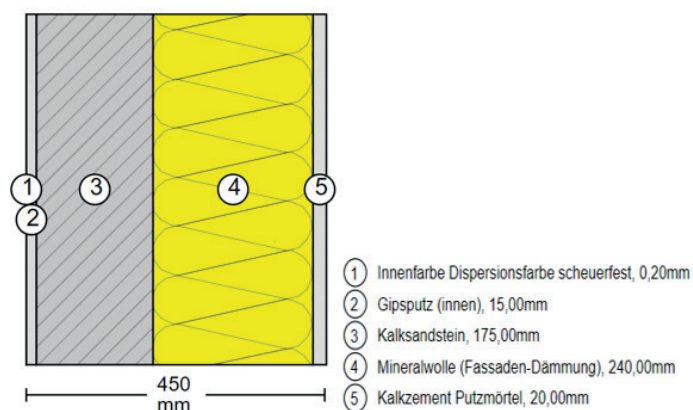
Außenwand

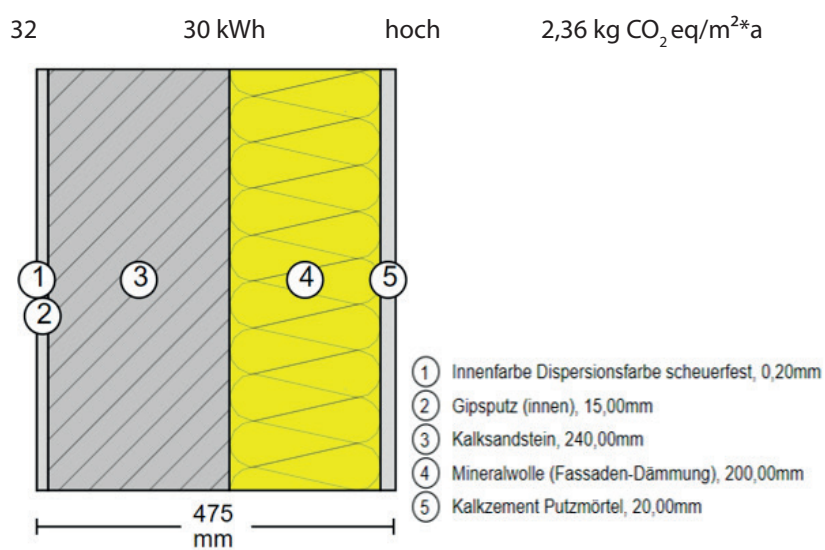
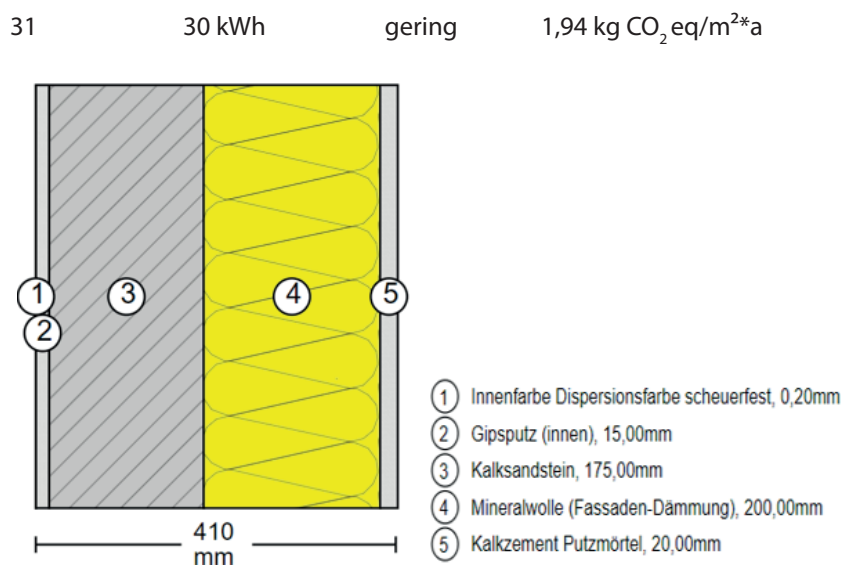
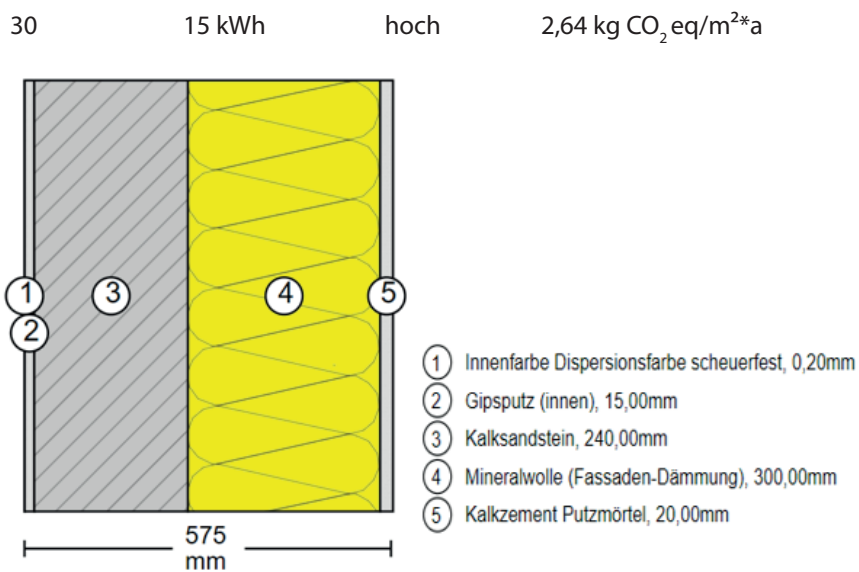
29 15 kWh

gering

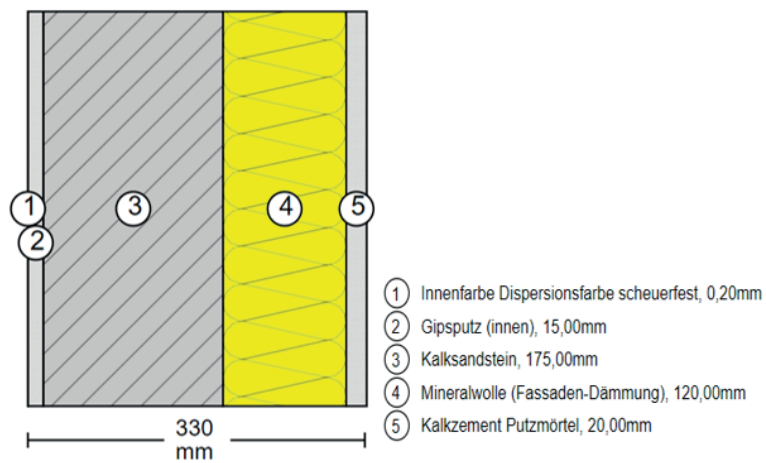
2,05 kg CO₂ eq/m²*a

Die Außenwandfläche entspricht der gemessenen Fassadenflächen der statistisch generierten Gebäude abzüglich der Fenster- und Türflächen. Die Fassadenflächen unterscheiden sich zwischen Gebäudetypen und unterschiedlichen Dichten. Bei hochgeschossigen Gebäuden (>2,5 Geschosse) ist ein stärkerer Wandaufbau notwendig als bei niedrigen Gebäuden (≤2,5 Geschosse). Außerdem hängt die Dämmstärke vom zu erreichenden U-Wert (und damit kWh) ab. Es wird eine Bruttogeschosshöhe von 3,00 m angenommen. Diese setzt sich aus 2,70 m lichter Höhe zuzüglich der Geschossdecke zusammen. Holzaußenwände sind in Holzrahmenbauweise gefertigt, während im Massivbau Kalksandsteinmauerwerk angenommen

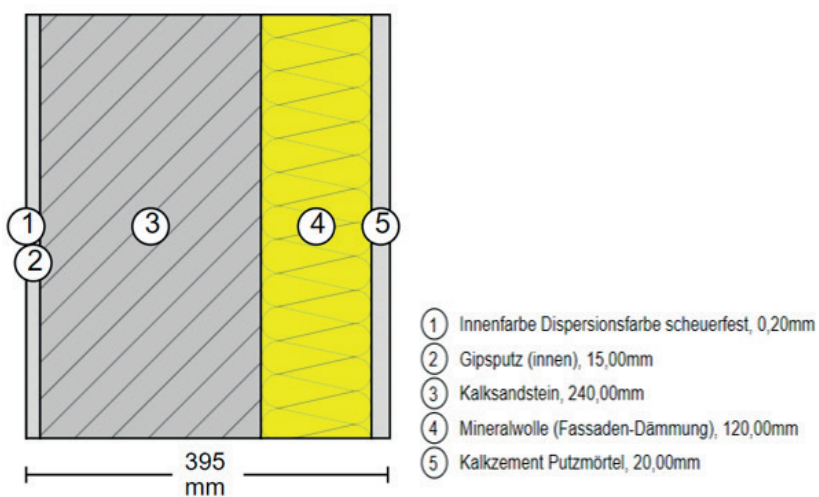




33 70 kWh gering 1,71 kg CO₂ eq/m²*a



34 70 kWh hoch 2,13 kg CO₂ eq/m²*a



Außentüren und Fenster

siehe Holzbauweise (Nr. 09 und Nr. 10)

Kellerwände

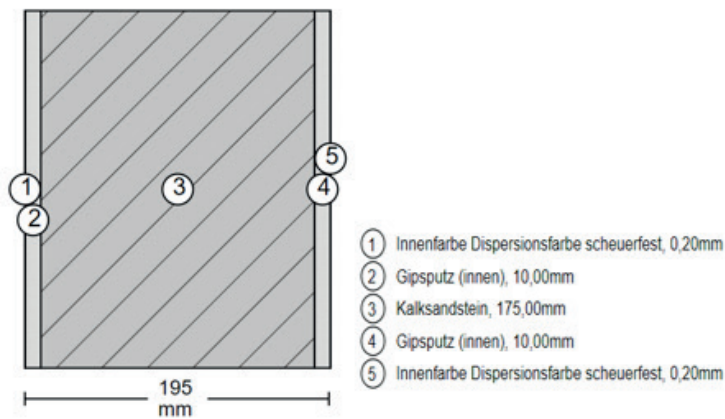
siehe Holzbauweise (Nr. 11 und Nr. 12)

Innentüren

siehe Holzbauweise (Nr. 15)

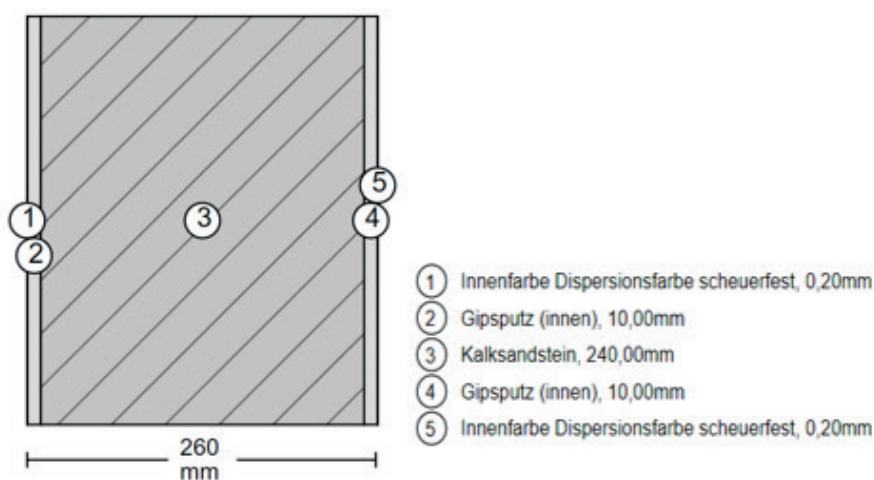
Tragende und nichttragende Innenwände

35 tragend 15/30/70 kWh gering 1,3 kg CO₂ eq/m²*a

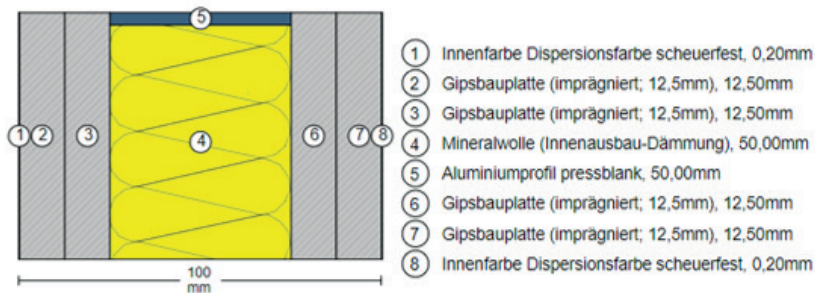


Die Mengen wurden aus dem gemessenen Innenwandaufbau der repräsentativen Realprojekte (Passivhaus Datenbank) abzüglich der Innentürflächen ermittelt. Eine Tür entspricht 2 m² und die Wandhöhe innen wurde auf 2,50 m festgesetzt. Bei großen Gebäudetypen wurde ein Durchschnitt aus großen und kleinen Wohnungen gezogen. Wohnungstrennwände werden hälftig den angrenzenden Wohneinheiten zugerechnet. Bei den großen Gebäudetypen sind Wohnungstrennwände tragend. Bei Kellerinnenwänden werden dieselben Mengen und Konstruktionen der Innenwände angenommen, wie in den anderen Geschossen. Allerdings umfasst der Keller in kleinen Gebäudetypen nur die Hälfte der Grundfläche, weshalb auch der Innenausbau halbiert wurde. Bei hochgeschossigen Gebäuden werden 100% angerechnet.

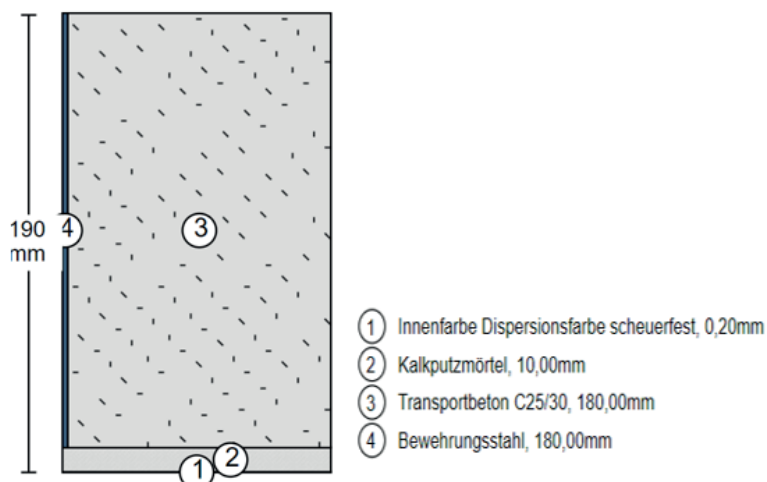
36 tragend 15/30/70 kWh hoch 1,71 kg CO₂ eq/m²*a



37 nicht-tragend 15/30/70 kWh gering/hoch 0,62 kg CO₂ eq/m²*a



38 Decken 15/30/70 kWh gering/hoch 1,34 kg CO₂ eq/m²*a

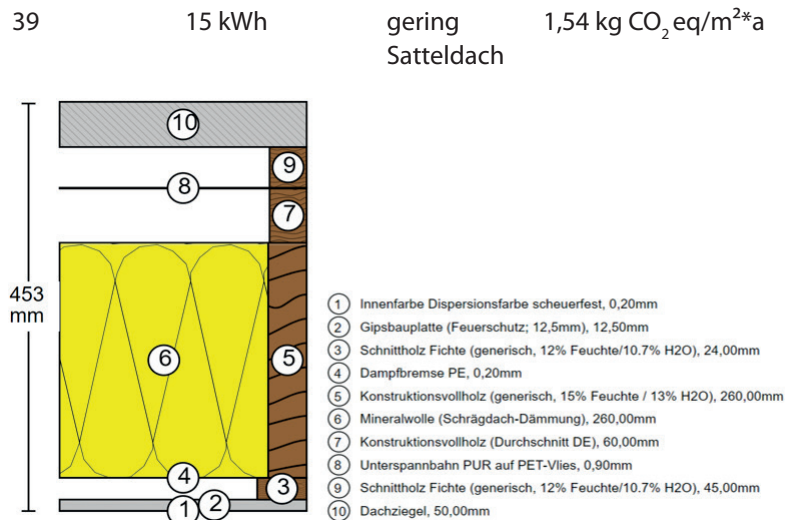


Die Fläche errechnet sich aus der Bodenfläche pro Geschoss abzüglich der Treppenausschnitte. Bei den kleinen Gebäudetypen wird aufgrund der halben Unterkellerung nur die Hälfte der Decke zwischen Keller und EG berechnet

Treppen

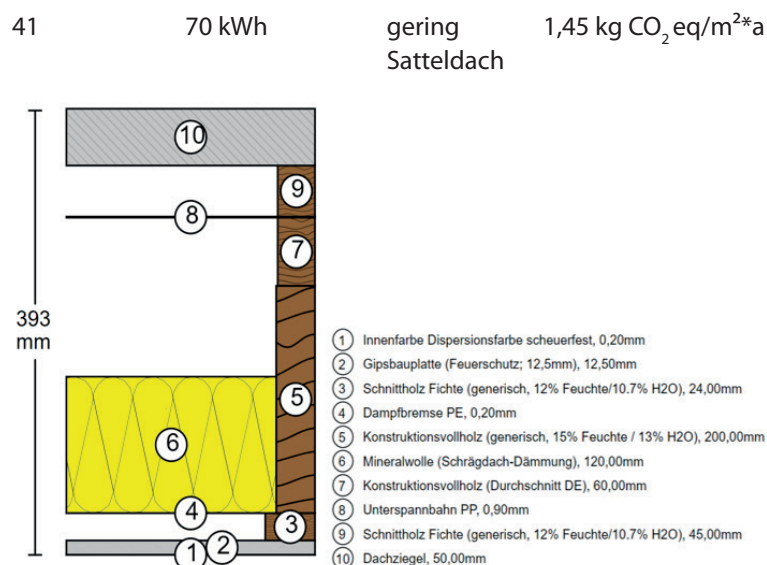
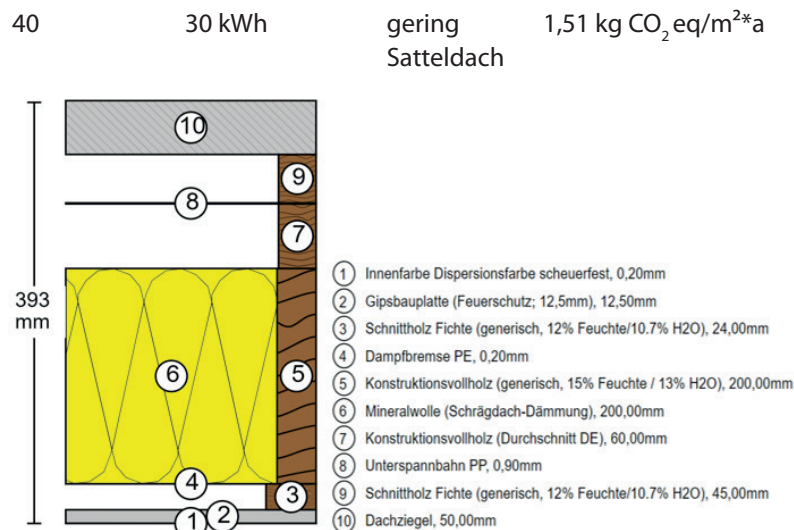
siehe Holzbauweise (Nr. 17 und Nr. 18)

Dachkonstruktionen

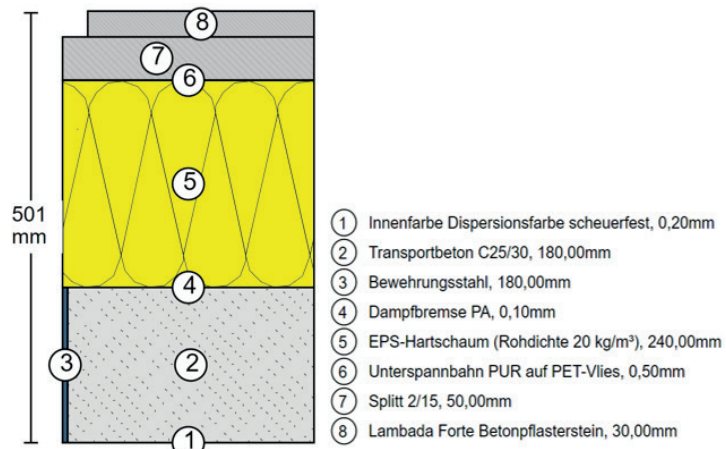


Bei Häusern mit geringer Geschos-sigkeit wird immer ein Satteldach in Holzbauweise angenommen (auch im Massivbau).

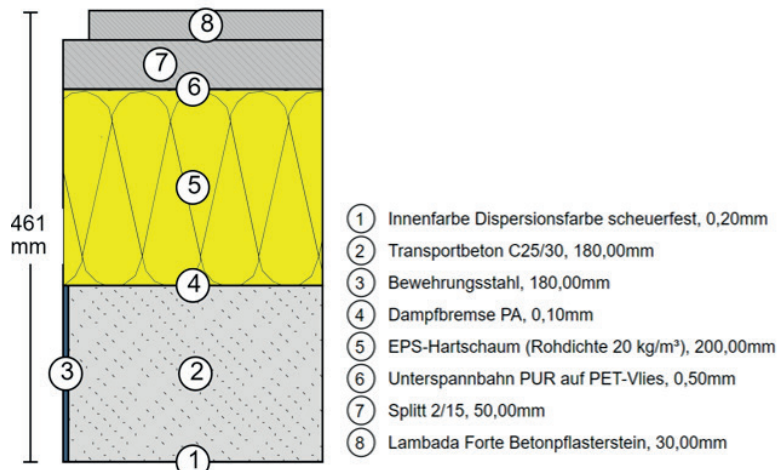
Bei Häusern mit hoher Geschos-sigkeit wird immer ein Flachdach angenommen, wobei hier in Holz-Flachdach und Massiv-Flachdach unterschieden wird. Die Decke des obersten Geschosses ist auch beim Flachdach nicht im Dach ver-rechnet, sondern separat.



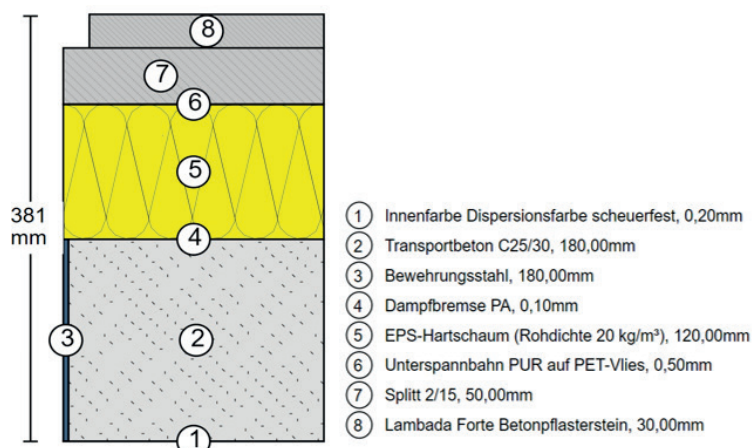
42 15 kWh hoch 2,16 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



43 30 kWh hoch 2,06 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



44 70 kWh hoch 1,85 kg CO₂ eq/m²*a
Flachdach



KG 400 - Gebäudetechnik

KG 410 - Abwasser-, Wasser- und Gasanlagen

45 Trinkwasserversorgung Hausanschluss 0,12 kg CO₂ eq/lm*a

vgl. Abschnitt 'Trinkwasserversorgung Sammelanschluss'

46 Abwasser Hausanschluss 1,02 kg CO₂ eq/lm*a

vgl. Abschnitt 'Trinkwasserversorgung Sammelanschluss'

KG 420 - Wärmeversorgungsanlagen

Berechnung Wärmebedarf und Trinkwarmwasserbedarf

Trinkwarmwasserbedarf (kWh/a) = (34,3 Wh/m² * 365 d/a * NGF m²) / 1000

Der Trinkwarmwasserbedarf wurde aus Literaturwerten (Bader et al 2021) für den durchschnittlichen Bedarf pro Quadratmeter Nettogrundfläche pro Jahr berechnet. Der Warmwasserbedarf wurde für 60 °C, wie folgt, berechnet.

Raumwärmebedarf (kWh/a) = Nettogrundfläche (m²) * Energiestandard (kWh/m²)

Der Raumwärmebedarf wurde über die durch das Projekt vorgegebenen Energiestandards (15, 30 und 70 kWh/m² NGF) und Parameter berechnet. Der Raumwärmebedarf wird in kWh pro Jahr gerechnet.

Wärmebedarf gesamt (kWh/a) = Raumwärmebedarf (kWh/a) + Trinkwarmwasserbedarf (kWh/a)

Der Gesamtwärmebedarf der einzelnen Gebäude im Jahr ergibt sich aus der Addition von Raumwärme- und Trinkwarmwasserbedarf.

Installierte thermische Leistung (kW) = (Raumwärmebedarf kWh/ 1900 h) + (Trinkwarmwasserbedarf kWh/ 8760 h) Die thermisch benötigte Leistung der Wärmeerzeuger wurde für die unterschiedlichen Energiestandards für eine Raum-Beheizungsperiode von 1900 Volllaststunden und den Trinkwarmwasserbedarf für ein ganzes Jahr in Stunden (8760 Stunden) ausgelegt. Die Leistung wird in Kilowatt angegeben. In der Auswahl-excel ist die thermisch benötigte Leistung für das gesamte Siedlungssegment pro Gebäudetypen und Siedlungsdichte angegeben. Für die Auswertung in eLCA wird die errechnete Leistung auf ein Gebäude pro Gebäudetyp und Siedlungsdichte aufgeteilt.

Betriebsenergie (kWh/a) = Wärmebedarf (kWh/a) / Wirkungsgrad (JAZ)

Zur Berechnung des CO₂-Ausstoßes im Betrieb werden die Betriebsmittel/ Betriebsenergien für die Wärmeerzeugung über den Wirkungs-grad des Wärmeerzeugers (z.B. JAZ der Wärmepumpen) und den errechneten Wärmebedarf genutzt. Die benötigten Betriebsenergien werden hierfür in kWh/a berechnet. Unter Betriebsenergien fallen hierbei z.B. Gasverbräuche, Stromverbräuche, verbrannte Biomasse.

CO₂-Ausstoß Betrieb (kg/m²) = (Betriebsenergie (kWh/a)*CO₂-Faktor BAFA (kg/kWh))/NGF (m²)

Die Wirkungsgrade und ähnliches werden aus Mittelwerten aus technischen Datenblättern der genutzten Technik ermittelt. Die errechnete Betriebsenergie wird mit CO₂-Faktoren des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle des Jahres 2023 (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2023) verrechnet um den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß Betrieb pro m² NGF zu erhalten.

Allgemeine Annahmen zur Modellierung in eLCA

Die Wärmeübergabe im Gebäude findet über eine Flächenheizung in Form einer Fußbodenheizung statt. Die beheizte Fläche wird im Modell mit der NGF pro Gebäude (EFH, DH, RH) oder NGF pro WE (ZH, PH, MGH) angegeben. Jedes Gebäude verfügt über einen Technikraum/ Heizungsraum im Kellergeschoss, in welchem die Pufferspeicher für Heizungs- und Trinkwarmwasser, die Übergabestation der Nahwärme/Fernwärme oder die dezentralen Wärmeerzeugungsanlagen aufgestellt sind. Des Weiteren befindet sich der Trinkwasser-Hausanschluss ebenfalls im Technikraum und ist pro Gebäude ausgelegt. Die Kaltwassereinführung ins Gebäude ist mit 4 cm PUR-Rohrdämmung gedämmt und verfügt je nach Größe des Gebäudes über ein bis zwei Pumpen. Der Technikraum verfügt über eine Raumhöhe von 2,8 m. Der Trinkwasser-Hausanschluss ist auf einer Höhe von 1,1 m eingebaut. Die aus dem Technikraum herausführenden Leitungen und Stränge (Heizungs- und Trinkwarm- und Kaltwasserleitungen) werden im eLCA-Modell unter dem Bauteil „Hausanschlussraum“ aufgeführt und werden in der Berechnung der Strang- und Verteilerleitungen von der weiteren Heizungs- und Trinkwasserinstallation nicht berücksichtigt. Alle Leitungen des Haustechnikraums sind mit 4 cm PUR-Hartschaumdämmung modelliert. Die Geschosshöhe beträgt 3 m. Das Satteldach der Gebäudetypen EFH, DH und RH wird mit einer Neigung von 30° und mit einer Dachfläche mit Ausrichtung Süden angenommen. Die Gebäudetypen ZH, PH und MGH verfügen über ein Flachdach.

Wasserinstallation:

Die Trinkwasserinstallation wird bis zur Abnahmestelle mit je einem Kalt- und einem Warmwasserstrang modelliert. Es wird keine Zirkulationsleitung berücksichtigt. Die Länge der Stränge wird pro Stockwerk (ohne Kellergeschoss) gerechnet, das oberste Stockwerk bis zum höchst liegenden Abnehmer (Duscharmatur auf 1,5 m Höhe). Die Verteilerleitungen zu den einzelnen Abnehmern werden ebenso mit je einer Kaltwasser- und Warmwasserleitung modelliert. Pro Stockwerk/pro WE wird ein Bad und eine Küchenzeile, räumlich durch eine Wand getrennt, angenommen. Alle Leitungen der Trinkwasserinstallation werden aufgrund der schwierigen Datenlage zu Sanitärtechnik in eLCA als Stahlleitungen angenommen. Die Leitungsdurchmesser werden nach durchschnittlicher Durchflussmenge nach den anerkannten Regeln der Technik angenommen. Je Kaltwasser- und Warmwasserstrangleitung wird eine Pumpe > 50 W Leistung installiert. Alle Trinkwasserleitungen sind mit 4 cm PUR-Hartschaumdämmung isoliert und thermisch voneinander getrennt. Es wird nur die Trinkwasserinstallation berücksichtigt. Die Abwasserinstallation wurde nicht modelliert.

Heizungsinstallation:

Die Heizungsinstallationsleitungen wurden zur Modellierung in die Abschnitte Strangleitungen, Raumheizflächen und Installationsleitungen direkt am Wärmeversorger aufgeteilt. Alle Heizungsleitungen sind mit PUR-Hartschaum isoliert. Die Strang- und Installationsleitungen am Wärmeversorger werden mit je einem Vor- und Rücklauf modelliert. Die Raumheizflächen sind als Fußbodenheizung in PEX-Rohrsysteme pro NGF in m² pro WE modelliert. In den Datensätzen zur Fußbodenheizung sind Befestigungen, die Übergabestation von Strangleitung zu PEX-System und Dämmung vorhanden. Die PEX-Rohre sind mit 100 mm Abstand in der Ringlegung angenommen. Strang- und Installationsleitungen des Heizungssystem sind mit dem Datensatz Stahlrohr modelliert und ihre Durchmesser je nach Durchflussmenge/ Abnahmemenge ausgelegt worden.

Spezifische Annahmen zur Modellierung der einzelnen Gebäudetypen in eLCA

Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaushaus

Für die Betrachtung der Einfamilienhäuser (Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaushaus) werden die einzelnen Bauteile gebäudeweise berechnet. Einzelne Bauteile wie die Hausanschlussleitung und der Wärmeerzeuger werden pro Gebäude modelliert und pro m² NGF in der Ökobilanz verrechnet. Der Hausanschluss wird mit 4m DN 50 Stahlrohrleitung, welche mit 40 mm PUR-Hartschaum gedämmt sind, und einer Pumpe angenommen. Leider verfügt der genutzte Datensatz in eLCA zur genauen Abbildung der Hausanschlussleitung nicht über die benötigten Daten (z.B. Wasserzähler, Filter, etc.).

Heizfläche und Verteilerleitungen:

Die Heizflächen werden als Fußbodenheizung abgebildet und über die gesamte Fläche NGF berechnet. Es werden 8 m Edelstahlrohrleitung DN 40 zum Anschluss des Wärmeerzeugers und eventuellen Pufferspeichers angenommen. Alle Leitungen sind mit 40 mm PUR-Hartschaum gedämmt. Es werden 2 Umwälzpumpen für Vorlauf und Rücklauf eingebaut. Die Strang- und Verteilerleitungen werden jeweils mit einem Vorlauf und Rücklauf ausgelegt und in Edelstahl oder wenn möglich in Kupfer geplant. Die Geschosshöhe pro Obergeschoss wird mit 3 m angenommen. Alle Strangleitungen sind mit 40 mm PUR-Dämmung gedämmt.

Trinkwarm-/kaltwasseranlage:

Die Warm- und Kaltwasserstränge sind ohne Zirkulationsleitung modelliert. Es werden 6 m Leitung (beide Stränge) pro Geschoss angenommen. Die Abzweige Küche und Bad überbrücken ca. 8 m Leitung pro WE (4 m Kaltwasser, 4 m Warmwasser). Alle Leitungen sind durch 40 mm PUR-Rohrisolation thermisch voneinander getrennt.

Zeilenhaus, Punkthaus, Mehrgeschosshaus

Für die Betrachtung der Mehrfamilienhäuser (Zeile-, Punkt und Mehrgeschosshaus) werden die einzelnen Bauteile gebäudeweise berechnet. Einzelne Bauteile wie die Hausanschlussleitung und der Wärmeerzeuger werden pro Gebäude modelliert und pro m² NGF in der Ökobilanz verrechnet. Für den Hausanschluss werden DN50 Leitungen mit circa 6 m Länge und mit 2 Pumpen, welche Druckerhöhung und Filter darstellen, angenommen. Die einzelnen Heizungsverteilungsleitungen und die Trinkwasserabzweige in die Wohnungen werden pro Wohneinheit berechnet. Ein Strang für die Trinkwasserinstallation und die Heizungsleitungen versorgt hierbei 4 WE.

Trinkwarm-/kaltwasseranlage:

Die Abzweige Küche und Bad werden pro Gebäude pro Wohneinheit ausgelegt. Es werden 2 Verteilerleitungen für Warm- und Kalttrinkwasser in die WE gelegt. Dabei wird angenommen, dass Küche und Bad nah aneinander liegen, um Materialkosten zu sparen. Vom Schacht der Strangleitungen bis zu den Abnehmern in der WE werden 4,5 m DN40 gedämmte Stahlrohrleitungen angedacht. Somit wird die Trinkwasserinstallation ab den Strangleitungen mit 9 m Stahlrohrleitung pro WE (für Kalt- und Warmwasser) modelliert. Die Leitungen werden mit 40 mm PUR-Hartschaum thermisch voneinander getrennt.

Heizfläche und Verteilerleitungen:

Die Raumheizflächen werden pro WE nach den oben genannten Parametern berechnet. Die Strangleitungen der Heizung werden pro 4 WE gerechnet und mit Vorlauf und Rücklauf pro Strang aufgeteilt. Die Strangleitungen sind durch 40 mm PUR-Hartschaum thermisch voneinander getrennt. Die Leitung Warmwasser-Strang, Heizung-Strang-VL und Heizung-Strang-RL überbrücken jeweils 2,5 m aus dem Haustechnikraum (insgesamt 7,5m) DN40 Stahlrohrleitungen mit 40mm PUR-Hartschaum Dämmung.

Erfasste Bauteilgruppen

Im folgenden Text werden alle für die Modellierung erstellten Bauteile aufgelistet. Die Auflistung wird wie folgt gelesen: Kostengruppe - Bauteil - Bauteilkomponenten - Baustoffe (Datensätze ÖKOBAUDAT). Alle Mengen der jeweiligen Bauteile sind in der Excel „Q-LCA Eingabemaske eLCA Haustechnik“ für den jeweiligen Wärmeerzeuger und den unterschiedlichen Gebäudetypen und Energiestandards dokumentiert.

Auflistung modellierter Bauteile nach Kostengruppen:

Kostengruppe 410: Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen

Trinkwarmwasserversorgung

- Hausanschluss
 - Umwälzpumpe 50-250 W
 - Stahlrohr
 - Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Strangleitungen und Verteilerleitungen
 - Stahlrohr
 - Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
 - Umwälzpumpe 50-250 W
- Abzweig Küche/Bad
 - Stahlrohr
 - Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)

Trinkwarm-/kaltwasserversorgung

- Hausanschluss
 - Umwälzpumpe 50-250 W
 - Stahlrohr
 - Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Strangleitungen und Verteilerleitungen
 - Stahlrohr
 - Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
 - Umwälzpumpe <50 W
- Abzweig Küche/Bad
 - Stahlrohr
 - Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)

Kostengruppe 420: Wärmeversorgungsanlagen

Biomassekessel

- Biomassekessel: Hackschnitzelkessel < 20 kW
- Biomassekessel > 20 kW: Hackschnitzelkessel 20-120 kW

Fernwärme

- Fernwärme Haustechnikraumanschlüsse
Stahlrohr, Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Fernwärme Übergabestation (Roe)
Übergabestation Fernwärme

Fernwärme Mehrfamilien

- Fernwärme Haustechnikraumanschlüsse
Stahlrohr
Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Fernwärme Übergabestation (Roe)
Übergabestation Fernwärme

Gas-Brennwertkessel

- Gas-Brennwertkessel dezentral
Gas-Brennwertgerät <20 kW (Standgerät)
Umwälzpumpe <50 W
Pufferspeicher (Edelstahl)
Schornstein Edelstahl (Einwandig)
- Gas-Brennwertkessel dezentral >20 kW (<30 kW)
Gas-Brennwertgerät 20-120 kW (Standgerät)
Umwälzpumpe <50 W
Pufferspeicher (Edelstahl)
Schornstein Edelstahl (Einwandig)
- Gas-Haustechnikraumanschlüsse
Stahlrohr
Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Infrastruktur und Zuleitungen (Gas)
Stahlrohr

Infrastruktur Nahwärme/Fernwärme

- Infrastruktur und Zuleitungen
Stahlrohr
Steinwolle Heizungsrohrschale

Luft-Wasser-Wärmepumpe

- Luft-Wasser-Wärmepumpe dezentral
Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10 kW
Umwälzpumpe < 50 W
Pufferspeicher (Edelstahl)

- Haustechnikraumanschlüsse
Stahlrohr
Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)

Nahwärme

- Nahwärme Haustechnikraumanschlüsse
Stahlrohr
Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Nahwärme Übergabestation (Roe)
Übergabestation Fernwärme

Nahwärme Mehrfamilienhaus

- Nahwärme Haustechnikraumanschlüsse
Stahlrohr
Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Nahwärme Übergabestation (Roe)
Übergabestation Fernwärme

Solarthermie

- Solarthermie
Solaranlage Flachkollektor

Sole-Wasser-Wärmepumpe

- Sole-Wasser-Wärmepumpe
Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 10 kW
Umwälzpumpe < 50 W
Pufferspeicher (Edelstahl)
Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 10
- Haustechnikraumanschlüsse
Stahlrohr
Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)

Strangleitungen und Heizflächen

- Strangleitungen und Verteilerleitungen
Stahlrohr
Polyurethan Hartschaum (Rohrisolierung)
- Fußbodenheizung
Fußbodenheizung PEX (100 mm Abstand)

Kostengruppe 440: Starkstromanlagen

- Photovoltaikanlagen
- Photovoltaiksystem 1000 kWh/m²*a ohne Stromgutschrift

Verwendete Baustoffe der einzelnen Wärmeerzeuger

Im Folgenden Text werden die einzelnen Wärmeerzeuger beschrieben und ihre zur Berechnung verwendeten Bauteile aufgezählt. Die Bauteilliste wird wie folgt gelesen und bezieht sich auf die oben genannte Bauteilauf-listung: Kostengruppe > Übergeordnetes Bauteil (Bauteilkomponente).

Gas-Brennwertkessel dezentral:

Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaushaus:

- KG 410: Trinkwarmwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Gas-Brennwertkessel (Gas-Brennwertkessel dezentral, Gas-Haustechnikraumanschlüsse, Infrastruktur und Zuleitungen (Gas)), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung)

Zeilenhaus, Punkthaus, Mehrgeschosshaus:

- KG 410: Trinkwarm-/kaltwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Gas-Brennwertkessel (Gas-Brennwertkessel dezentral, Gas-Haustechnikraumanschlüsse, Infrastruktur und Zuleitungen (Gas)), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung)
- Der Gas-Brennwertkessel dezentral wird mit seiner benötigten Leistung pro Gebäude berechnet. Bei thermischer Leistung größer 30 kW werden die Gas-Kessel pro Heizungsstrangleitung ausgelegt.
- Die thermisch benötigte Leistung wurde über den pro Gebäude benötigten Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf berechnet.
- Es sind Pufferspeicher zur Heizungsunterstützung vorgesehen. Es wird ein Pufferspeicher pro Wärmeerzeuger berechnet. Das Pufferspeichervolumen wird abhängig zur benötigten Wärmeerzeugerleistung berechnet (siehe Eingabemaske).
- Für die Versorgung der Gasanlage wurde Infrastruktur in Form von Gaszuleitungen modelliert. Hierzu wurden die Infrastruktur-Leitungslängen der Projektparameter auf ein jeweiliges Gebäude herunter skaliert und in eLCA modelliert. Des weiteren wurden Schornsteine zur Abgasabführung von der Feuerungsstätte über die Höhe der angegebenen Stockwerke und des Kellerraums geplant.

Luft-Wasser-Wärmepumpe dezentral (in eLCA verwendete Bauteile)

Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaushaus:

- KG 410: Trinkwarmwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Luft-Wasser-Wärmepumpe (Luft-Wasser-Wärmepumpe dezentral, Haustechnikraumanschlüsse), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung)

Zeilenhaus, Punkthaus, Mehrgeschosshaus:

- KG 410: Trinkwarm-/kaltwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Luft-Wasser-Wärmepumpe (Luft-Wasser-Wärmepumpe dezentral, Haustechnikraumanschlüsse), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung)
- Die Luft-Wasser-Wärmepumpe dezentral wird mit seiner benötigten Leistung pro Gebäude berechnet. Bei thermischen Leistungen größer 30 kW werden die Wärmepumpen pro Heizungsstrangleitung ausgelegt. Die Wärmepumpen wurden nach ihrer Leistungsgröße in ihrer Masse ausgelegt auf der Grundlage einer 10 kW Luft-Wasser-Wärmepumpe.
- Es sind Pufferspeicher zur Heizungsunterstützung vorgesehen. Es wird ein Pufferspeicher pro Wärmeerzeuger berechnet. Das Pufferspeichervolumen wird abhängig zur benötigten Wärmeerzeugerleistung berechnet. Hierbei wurde sich auf Erfahrungswerte aus der Technik berufen (Basiswert: 750 Liter Pufferspeicher für 10 kW Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Warmwasserbetrieb).

Kalte Nahwärme: Erdwärme-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage (in eLCA verwendete Bauteile)

Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaushaus:

- KG 410: Trinkwarmwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Infrastruktur Nahwärme/Fernwärme (Infrastruktur und Zuleitungen), Nahwärme (Nahwärme Haustechnikraumanschlüsse, Nahwärme Übergabestation), Sole-Wasser-Wärmepumpe (Sole-Wasser-Wärmepumpe, Haustechnikraumanschluss), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung); KG 440: Photovoltaikanlage (Photovoltaikanlage)

Zeilenhaus, Punkthaus, Mehrgeschosshaus:

- KG 410: Trinkwarm-/kaltwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Infrastruktur Nahwärme/Fernwärme (Infrastruktur und Zuleitungen), Nahwärme Mehrfamilien (Nahwärme Haustechnikraumanschlüsse, Nahwärme Übergabestation), Sole-Wasser-Wärmepumpe (Sole-Wasser-Wärmepumpe, Haustechnikraumanschlüsse); KG 440: Photovoltaikanlage (Photovoltaikanlage)
- Die Erd-Wärmepumpe wird mit ihrer benötigten Leistung pro Gebäude berechnet.

Aufbau Nahwärmenetz:

- Die Längen für die Auslegung der Infrastruktur sind pro Gebäude aus den im Projekt definierten Gebäudeparametern berechnet. Die Rohre sind mit Stahlrohren mit 200 mm Durchmesser und 100 mm PUR-Hartschaum Dämmung modelliert worden.

Photovoltaikanlage:

- Die Satteldächer des EFH, DH und RH werden zu 50% der Fläche belegt (auf die Dachhälfte Richtung Süden). Die Flachdächer des ZH, PH und MGH werden zu 85% der Fläche belegt, um freien Raum für Revisionsgänge und Blitzschutz zu gewährleisten. Verkabelung und das Montagesystem sind im Datensatz der Photovoltaikmodule in eLCA enthalten und werden somit nicht zusätzlich modelliert.

Erdwärme-Wärmepumpe:

- Die Erdwärme-Wärmepumpe wird mit einem Erdsondenfeld simuliert. Die Massen für Verbindungsrohre und Verkabelung sind im Datensatz der Erdsonden mit inbegriffen. Die Erdsonden sind pro Kilowatt thermischer Leistung ausgelegt. Der CO₂-Ausstoß des Betriebs der Sole-Wasser-Wärmepumpe wird über einen Durchschnittsfaktor Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2023) für den deutschen Strommix aus 2023 des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle berechnet (siehe Auswahl-Excel).

Warme Nahwärme: Solarthermieranlage mit Biomassekessel (n eLCA verwendete Bauteile)

Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaushaus:

- KG 410: Trinkwarmwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Biomassekessel (Biomassekessel), Infrastruktur Nahwärme/Fernwärme (Infrastruktur und Zuleitungen), Nahwärme (Nahwärme Haustechnikraumanschlüsse, Nahwärme Übergabestation), Solarthermie (Solarthermie), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung)

Zeilenhaus, Punkthaus, Mehrgeschoßshaus:

- KG 410: Trinkwarm-/kaltwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Biomassekessel (Biomassekessel), Infrastruktur Nahwärme/Fernwärme (Infrastruktur und Zuleitungen), Nahwärme Mehrfamilien (Nahwärme Haustechnikraumanschlüsse, Nahwärme Übergabestation), Solarthermie (Solarthermie), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung).
- Die Solarthermieranlage und die Biomassekessel werden mit ihrer benötigten Leistung pro Gebäude berechnet. Der Wärmebedarf der einzelnen Abnehmer wird zu 60% durch die Solarthermieranlage gedeckt. Der Biomassekessel dient zur Spitzenlastabdeckung und dient zur Versorgung der übrigen 40%.

Aufbau Nahwärmenetz:

- Die Längen für die Auslegung der Infrastruktur sind pro Gebäude aus den Werten der Q-LCA-Excel berechnet. Die Rohre sind mit Stahlrohren mit 200 mm Durchmesser und 100 mm PUR-Hartschaum Dämmung modelliert worden.

Solarthermieranlage:

- Die Belegung der Solarthermieranlage wurde analog zu der Belegung der Photovoltaikanlage modelliert. Es wurde auf die Modellierung von Leitungen der Solarthermieranlage am Gebäude verzichtet, da diese in den Infrastruktur-Leitungen des Nahwärmenetzes mit inbegriffen sind.

Biomassekessel zur Spitzenlastabdeckung:

- Für die Auslegung des Spitzenlastkessels wird pauschal angenommen, dass in etwa 60% des Wärmebedarfs durch den Solarthermieanteil im Nahwärmenetz gedeckt werden kann. Somit wird der Biomassekessel für 40 % der benötigten Wärmeerzeugerleistung ausgelegt. Der Biomassekessel wird über einen Hackschnitzel-Kessel-Daten Satz im Modell simuliert.

Fernwärme (in eLCA verwendete Bauteile)

Einfamilienhaus, Doppelhaus, Reihenhaushaus:

- KG 410: Trinkwarmwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Fernwärme (Fernwärme Haustechnikraumanschlüsse, Fernwärme Übergabestation), Infrastruktur Nahwärme/Fernwärme (Infrastruktur und Zuleitungen), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung)

Zeilenhaus, Punkthaus, Mehrgeschosshaus:

- KG 410: Trinkwarm-/kaltwasserversorgung (Hausanschluss, Strangleitungen und Verteilerleitungen, Abzweig Küche/Bad); KG 420: Fernwärme Mehrfamilien (Fernwärme Haustechnikraumanschlüsse, Fernwärme Übergabestation), Infrastruktur Nahwärme/Fernwärme (Infrastruktur und Zuleitungen), Strangleitungen und Heizflächen (Strangleitungen und Verteilerleitungen, Fußbodenheizung)
- Die Übergabe der Fernwärme in die Gebäude wird mittels des Bauteils "Übergabestation Fernwärme" modelliert. Die Fernwärmeübergabestation wird nach Angaben im Datensatz in Kilogramm pro kW benötigter Leistung berechnet. Die Versorgungsleitungen zu den einzelnen Gebäuden wurde über die Infrastrukturangaben aus den in Excel aufbereiteten Gebäudeparametern des Projektes auf ein jeweiliges Gebäude herunter skaliert. Zur Berechnung in eLCA wurden gedämmte (100 mm PUR-Hartschaum) DN 200 Stahlrohre verwendet (kein treffenderer Datensatz vorhanden).
- Da die Fernwärme Standort unspezifisch betrachtet werden soll, kann das Wärmeversorgende System (z.B. Industrieabwärme, Müllverbrennungsanlage, etc.) nicht unabhängig abgebildet werden und fehlt somit in der ökobilanziellen Betrachtung. Der Betrieb des Fernwärmesystems wird über einen Durchschnitts CO₂-Faktor (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2023) des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle von 2023 berechnet (siehe Excelberechnung).

KG 430 - Raumlufthtechnische Anlagen

47 Lüftung 0,84 kg CO₂ eq/lm*a

Für die Ermittlung der Längen von Lüftungskanälen wurden exemplarische Realprojekte verschiedener Gebäudetypen aus der Passivhausdatenbank herangezogen (z.B. Behrens 2011). Aus den jeweiligen Lüftungsplänen wurden die Längen der Zu- und Abluftleitungen ausgemessen und pro Gebäudetyp eine durchschnittliche Kanallänge/m² Wohneinheit ermittelt. Bei kleinen Gebäudetypen beträgt die durchschnittliche Leitungslänge pro m² Wohneinheit 0,31 lm. Bei großen Gebäudetypen wurden 0,56 lm durchschnittliche Leitungslänge pro m² Wohneinheit ermittelt.

Da alle in dieser Forschungsarbeit untersuchten Gebäude hohe Energiestandards erfüllen, wurde für alle Gebäude eine zentrale Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung angenommen.

Gebäudetyp	Art der Lüftungsanlage	qm/WE	Leitungen Abluft (lm)	Leitungen Zuluft (lm)	Lüftungsleitungen ges./WE	Lüftungsleitungen (m)/qm	Quelle
Einfamilienhaus	zentral, Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung	160	10,5	37,5	48	0,3	EFH aus Seminar (Erfurt)
Reihenhaus	zentral, Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung	180	24,7	42	66,7	0,31	RH aus Seminar (München, Prinz-Eugen)
Punkthaus WE 1	zentral, Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung	100	25	36	61	0,61	PH aus Seminar (Ginsheim-Gustavsburg)
Punkthaus WE 2	zentral, Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung	75	15	27	42	0,56	PH aus Seminar (Ginsheim-Gustavsburg)
Mehrfamilienhaus	pro WE (dezentral), Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung	120	35,5	28	63,5	0,53	MFH aus Passivhaus-Datenbank (ID: 1968), Zugriff: https://passivehouse-database.org/#d_1968

KG 440 - Elektrische Anlagen

Elektrik	Küche (12 m ²)		Bad (8 m ²)		Allzweck-zimmer (15 m ²)		Wohn-zimmer (20 m ²)		Flur (5m ²)		Gäste_WC (2 m ²)		Gesamt-leitungs-länge (m)		Leitungs-länge/ Wohn-einheit	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Anzahl Steck-dosen	12	7	2	2	4	5	7	8	3	4	1	2				
Leitungslänge für Steckdo-sen/Raum*	120	70	20	20	40	50	70	80	30	40	10	20				
Anzahl Leuch-tenanschlüsse	2	3	2	2	1	4	2	3	2	4	1	2				
Leitungslänge für Leuchten-anschlüsse/ Raum*	20	30	20	20	10	40	20	30	20	40	10	20				
1-Zi-Whg. (45 m ²)	1	1	1	1	-	-	1	1	1	1	-	-	320	330	7,1	7,3
2-Zi-Whg. (60 m ²)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	370	420	6,1	7
3-Zi-Whg. (77 m ²) -> große Gebäudety-pen	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	440	550	5,7	7,1
4-Zi-Whg. (92 m ²) --> kleine Gebäudety-pen	1	1	1	1	3	3	1	1	2	2	1	1	540	720	5,9	7,8

Quellen:

*a: Unterfrauner, 2023

*b: Wellpott, Bohne, 2006, S. 462

48 Kabel	0,034 kg CO ₂ eq/lm*a
49 Schalter	0,017 kg CO ₂ eq/Stk*a
50 Steckdosen	0,013 kg CO ₂ eq/Stk*a

Die Stromversorgung innerhalb der Wohneinheiten wurde aus der durchschnittlichen Elektrik-Ausstattung von Wohnräumen entnommen (Unterfrauner 2023) und mit einem Elektrik-Plan für eine 4-Raum-Wohnung aus dem Handbuch zum Technischen Ausbau von Gebäuden (Wellpott, Bohne 2006, S. 462) gegengeprüft. Als durchschnittliche Leitungslänge pro Steckdose, Schalter bzw. Leuchtenanschluss wurden 10 Meter angenommen. Auf Basis der angenommenen Größe der Wohneinheiten konnten die durchschnittlichen Kabel-Laufmeter pro m² Wohneinheit (WE) berechnet werden. Diese liegt je nach Wohnungsgröße zwischen 5,71 lm und 7,11 lm (Unterfrauner 2023) bzw. zwischen 7,00 und 7,83 lm (Wellpott und Bohne 2006). Gemittelt über alle Wohnungsgrößen und die beiden Quellen ergibt dies eine durchschnittliche Leitungslänge von 6,77 lm/m². Auch die durchschnittliche Leitungslänge und die Raumgrößen wurden im Plan von Wellpott und Bohne (2006, S.462) gegengeprüft. Die angenommene Anzahl der Steckdosen und Schalter kann aus dem Dokument Elektrikannahmen (https://docs.google.com/spreadsheets/d/1YOkZ_DDchKEKqdbPs3LGMfYu99EBb3Zm²hzTlithO8/edit?usp=drive_link) entnommen werden.

Alle Werte in der hausinternen Stromversorgung hängen signifikant von der tatsächlichen Ausstattung und der Wohnungsgröße ab und können deshalb in der Praxis von den hier ermittelten Werten abweichen.

KG 460 - Förderanlagen

51 Aufzug	204,3 kg CO ₂ eq/Stk*a
-----------	-----------------------------------

Hochgeschossige Gebäude (>2,5 Geschosse) haben Aufzüge. Dabei deckt ein Aufzug jeweils dieselbe Anzahl an Geschossen ab, wie ein gesamtes Treppenhaus desselben Gebäudes. Bei Gebäuden mit mehr als vier Geschossen (ab dem fünften Geschoss) ist die Erschließung aller Wohneinheiten durch Aufzüge Pflicht. Aufzüge können Treppen jedoch nicht ersetzen, sondern nur ergänzen.

KG 500 - Außenanlagen und Freiflächen

KG 510 - Erdbau

52 Erdaushub 0,028 kg CO₂ eq/m³*a (für Leitungen)

vgl. Abschnitt 'Trinkwasserversorgung Sammelanschluss'

Für den Erdaushub wurden drei verschiedene Kategorien angenommen:

Erdaushub für Keller, Erdaushub für Leitungen und Erdaushub für Garagen. Der Erdaushub für Leitungen und Garagen ist der Kostengruppe 500 zugeordnet, während der Erdaushub für die Keller der Kostengruppe 300 bilanziert ist.

Für den Erdaushub der Leitungen wurde angenommen, dass der Aushub zu 100% wieder verfüllt wird. Für die Garagen und Keller wurde angenommen, dass 90% des Aushubs abtransportiert und nur 10 % des Aushubs auf dem Grundstück wieder verfüllt werden. Während bei Tiefgaragen das ganze Volumen der Garage (3,00 m tief) ausgehoben werden muss, ist unter den Hochgaragen nur ein 30 cm tiefer Aushub nötig. Für die Leitungen wird angenommen, dass lediglich ein Graben für alle zu verlegenden Leitungen pro Straße ausgehoben wird. Dabei wurde eine Aushubtiefe von 1,50 m angenommen.

Der Hauptanteil des GWPs wird nicht durch den Aushub an sich emittiert, sondern durch den Abtransport dessen zu Deponien oder anderen Baustellen (vgl. Fuchs 2023: 54). Jeder abtransportierte Kubikmeter Erdaushub emittiert 0,14 kg CO₂ eq/m³ *a, während der Aushub an sich davon nur 20% (0,028 kg CO₂ eq/m³a) einnimmt. Für die Transportstrecke wurden 30 km angenommen.

Quelle	Erdaushub Daten
Piatek_2021_Die CO ₂ -neutrale Baustelle (Diplomarbeit) (S. 68-69)	ohne Transport: 2,016 kg CO₂ eq/ m³ Erdaushub (S.53-54: 56459 kg CO₂-Eq/28000 m³) --> Aushub und Wiederverwendung auf dem Grundstück Anteilig auf 50 Jahre: 2,016 / 50 J. = 0,04 kg CO₂ eq/ m³ auf 50 Jahre mit Transport (mit LKW 16-32 t, Diesel, 30 km zur Deponie): GWP 100 = 10,10 kg CO₂ eq/m³ (S.68, 539.254 kg CO₂ eq/53.399,7 m³) Rechnung zu 53.399,7 m³: Umrechnung von 90.785 t in m³ --> x 0,5882 (Faktor, weil 1,7 t = 1 m³) = 53.399,7 m³ Anteilig auf 50 Jahre: 10,10 / 50 J. = 0,202 kg CO₂ eq/ m³ auf 50 Jahre LC-Phasen: A4 und A5
Kuhn_Stadt Zürich_2023_Untersuchungen von CO2-Emissionen von Erdbauarbeiten (S.20)	ohne Transport: 0.412 kg CO₂-eq/m³ Erdaushub Anteilig auf 50 Jahre: 0,412 / 50 J. = 0,008 kg CO₂ eq/m³ auf 50 Jahre mit Transport (12,6 km Vollfahrt, LKW 32-40t): 2,63 kg CO₂ eq/m³ Erdaushub bei 30 km Transportweg: 0,412 kg CO₂ eq/m³ + (2,218 kg CO₂ eq/ m³*2,38) = 5,69 kg CO₂ eq/m³ bei 30 km Transportweg Anteilig auf 50 Jahre: 5,69 / 50 J. = 0,114 kg CO₂ eq/m³ auf 50 Jahre nicht klar, welche Phasen eingerechnet wurden!

ÖKOBAUDAT, 2023: Bagger Dieselverbrauch für 1m³ Sandboden, Zugriff: https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6abf619b-9e1e-4c1d-996b-0458137d3303&version=20.24.070 (im Tool verwendet)	„Der Datensatz berücksichtigt den zum Bodenaushub für 1m³ nötigen Dieselverbrauch (0,3091 kg Diesel pro m³ Sandboden) und die damit verbundenen Emissionen: Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide, NMVOC, Staubpartikel, Schwefeldioxid. Der vorliegende Datensatz berücksichtigt weder die Baggerproduktion noch die Entsorgung des Baggers.“ --> 1.373 kg CO₂ eq/m³ Aushub ohne Entsorgung Aushub + Verfüllen = 1,373 kg CO₂ eq/m³ Aushub (bzw. auf 50 Jahre: 1,373/50 = 0,028 kg CO₂ eq/m³ Aushub auf 50 Jahre Aushub + Abtransport zur Deponie/Verfüllung (30 km) = 1,373 + (0,188*30) = 7,01 kg CO₂ eq/ m³ Erdaushub mit Abtransport (STAND ÖKOBAUDAT 2023) Anteil auf 50 Jahre: 7,01 / 50 Jahre = 0,14 kg CO₂ eq/ m³ Erdaushub mit Abtransport auf 50 Jahre Betrachtete LC-Phase: A5
ÖKOBAUDAT, 2023, Datenblatt zum Transport-LKW, Zugriff: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bb74d2a2-249a-4245-a1bb-7bde61f2f613&version=20.24.070&stock=OBD_2024_I&lang=de (im Tool verwendet)	„Der Datensatz bezieht sich auf den Transport von 1000 kg Transportgut über eine Distanz von 1 km mittels LKW (EURO 5) mit 20-26 t zulässiges Gesamtgewicht und 17,3 t Nutzlast im Speditionsverkehr mit 85% Auslastung. Die Gewinnung und Aufbereitung des Treibstoffes ist einbezogen. Die Herstellung des Fahrzeugs ist nicht in der Bilanz enthalten.“ --> 0,1107 kg CO₂ eq/km für 1000 kg Transportgut ca. 1700 kg Erdaushub passen in 1 m³ --> 0,1107*1,7 = 0,188 kg CO₂ eq/km pro m³ Erdaushub Anteil auf 50 Jahre: 0,188 / 50 Jahre = 0,004 kg CO₂ eq/km pro m³ Erdaushub auf 50 Jahre betrachtete LC-Phase: A4
von der Tann (2022) First steps in the development of standardised processes for life cycle assessments of geotechnical works	1,058 kgCO₂eq/m³ Anteil auf 50 J: 1,058 / 50 J. = 0,021 kgCO₂eq/m³ Transportkilometer nicht spezifiziert. „The default emission factors, electricity mix and transport distances specified in VegLCA were used“ --> nicht nachvollziehbar welche Daten zugrunde lagen. Betrachtete LC-Phasen: A1-A5
Fuchs, L. (2023): Handlungsempfehlungen zur Klimaneutralität im kommunalen Rohrleitungsbau (S. 54)	Bodenaushub und -wiedereinbau ohne Transport: 0,6 kg CO₂ eq/m³ Rechenweg: 151 kg CO₂ eq / 250 m³ Erdaushub Anteil auf 50 Jahre: 0,6 / 50 J. = 0,012 kg CO₂ eq/m³ auf 50 Jahre Bodenaushub mit Transport: Abtransport: 8,16 kg CO₂ eq/m³ (40 km) --> 6,12 kg CO₂ eq/m³ bei 30 km Transport Rechenweg: 1020 kg CO₂ eq / 125 m³ Erdaushub (nur die Hälfte von 250 m³ wird abtransportiert) --> 6,12 + 0,6 = 6,76 kg CO₂ eq/m³ bei 30 km Transportweg! Anteil auf 50 J.: 6,76 / 50 Jahre = 0,135 kg CO₂ eq/m³ *a

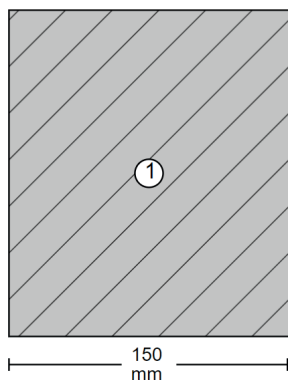
KG 530 - Oberbau, Deckschichten

Nr./ Name	GWP	Annahmen
53 Straße	1,19 kg CO ₂ eq/m ² *a	Das Straßenprofil orientiert sich an den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt 06) (Quellenangabe: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hg.): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. Köln 2006) und ist so gewählt, dass das Verhältnis von Verkehrsfläche zur Gesamtfläche der Segmente im Mittel dem der analysierten Siedlungsbereiche entspricht.
750 mm ① Gussasphalt, 40,00mm ② Asphalttragschicht, 120,00mm ③ Schotter 16/32 (getrocknet), 590,00mm		
54 Gehwege	1,19 kg CO ₂ eq/m ² *a	vgl. Abschnitt 'Straße'
750 mm ① Gussasphalt, 40,00mm ② Asphalttragschicht, 120,00mm ③ Schotter 16/32 (getrocknet), 590,00mm		
55 Stellplätze	1,26 kg CO ₂ eq/m ² *a	vgl. Abschnitt 'Straße'
340 mm ① A2-Betonpflaster- Standardstein grau mit Vorsatz, 140,00mm ② Schotter 16/32, 200,00mm Splitt 2/15 (getrocknet), 60 kg Splitt 2/15 (getrocknet), 629 kg		

KG 540 - Baukonstruktionen

56 Garagen 3,7 kg CO₂ eq/m²*a

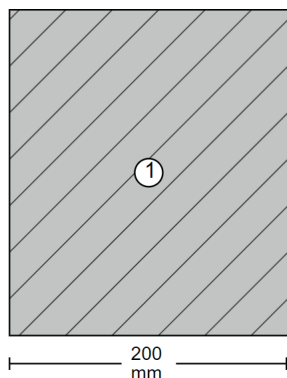
Außenwand Regelfall



① Beton-Mauersteine, 150 mm

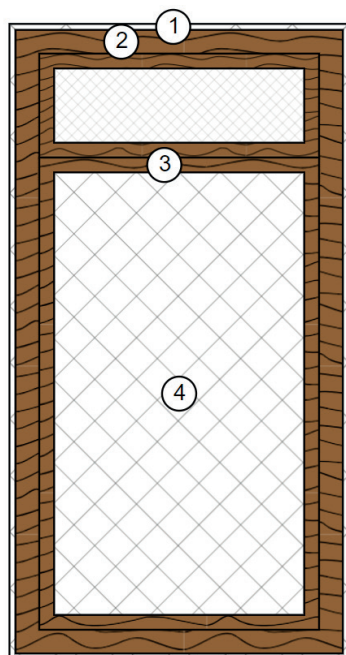
Die Bilanzrechnung erfolgt pro Stellplatz (15m²). Ein Stellplatz ist gleichbedeutend mit einer Garage. Es wird eine einfache, unge-dämmte Bauweise angenommen. Es wird ein Stellplatz pro Wohneinheit angenommen.

Außenwand Süd (mit Tor)



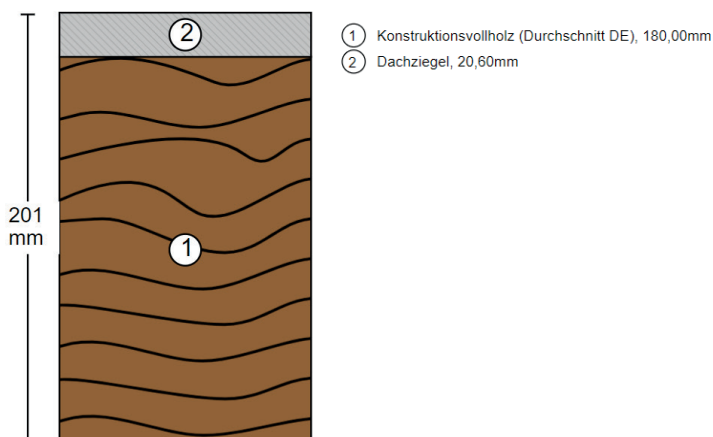
① Beton-Mauersteine, 200 mm

Außentür

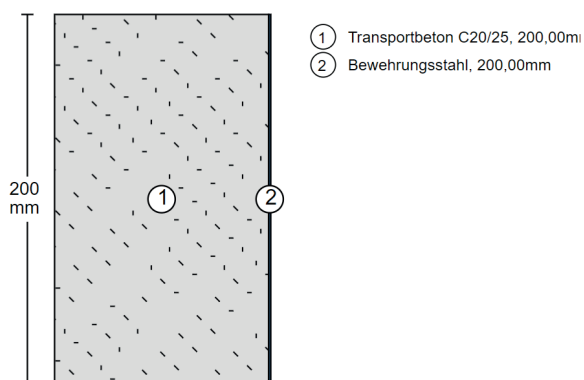


- ① Anschlussfuge: Elastomer Fugenbänder, Polyurethan
- ② Blendrahmen: Holz-Blendrahmen
- ③ Flügelrahmen: Holz-Flügelrahmen
- ④ Verglasung: Tür - Rubner Türen GmbH - Haustüren aus Holz

Dach

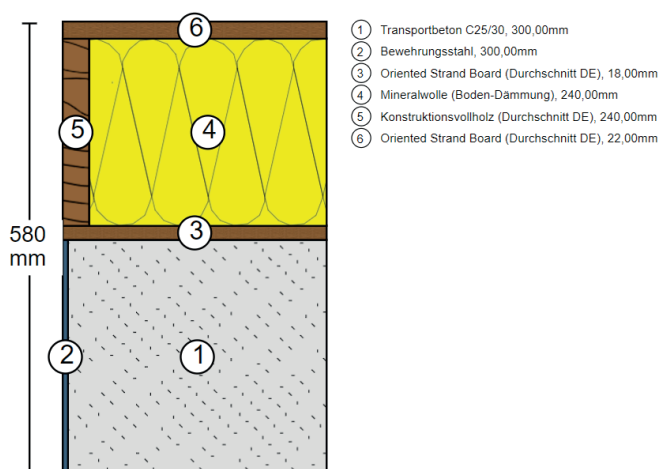


Bodenplatte



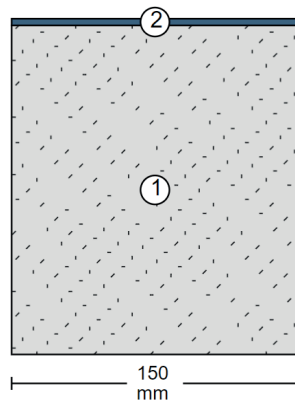
57 Tiefgaragen 5,82 kg CO₂eq/m²*a

Decke



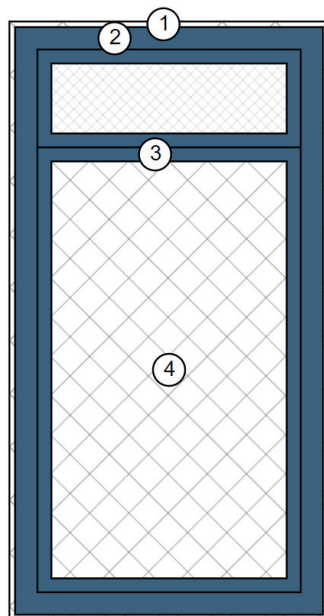
Die Bilanzrechnung erfolgte für eine ganze Tiefgarage und wurde danach auf die Einheit eines Stellplatzes (30 m²) bezogen (zur Massenermittlung siehe "Annahmen zu Mengen von Tiefgaragen und Kellern"). Für jede Wohneinheit wird ein Stellplatz angenommen.

Innenwände



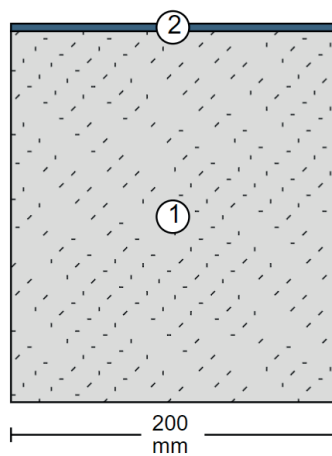
- ① Transportbeton C25/30, 150,00m
- ② Bewehrungsstahl, 150,00mm

Außentür



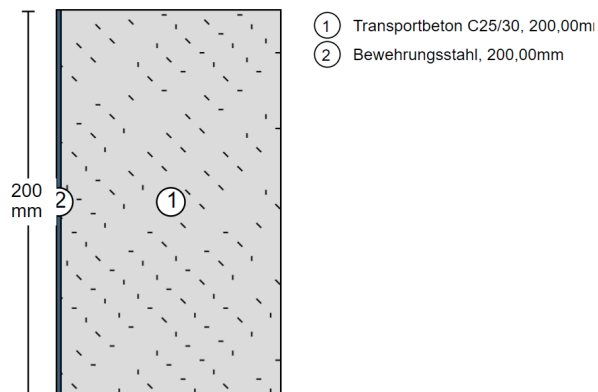
- ① Anschlussfuge: Elastomer Fugenbänder, Polyurethan
- ② Blendrahmen: Aluminium-Rahmenprofil, pulverbeschichtet
- ③ Flügelrahmen: Aluminium-Rahmenprofil, pulverbeschichtet
- ④ Verglasung: Tür - Rubner Türen GmbH - Haustüren aus Holz

Aufzugsschacht

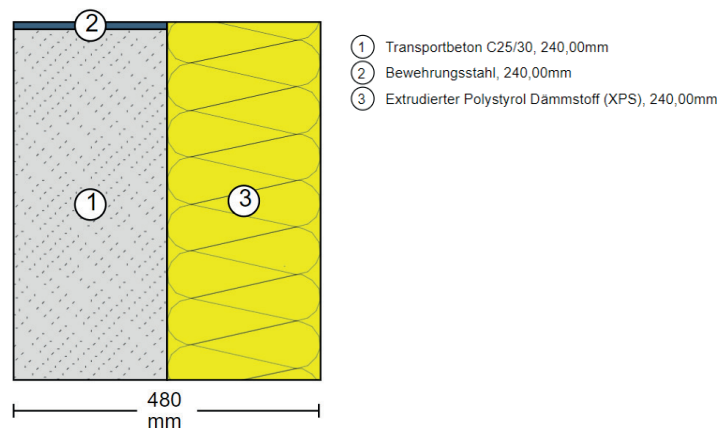


- ① Transportbeton C25/30, 200,00m
- ② Bewehrungsstahl, 200,00mm

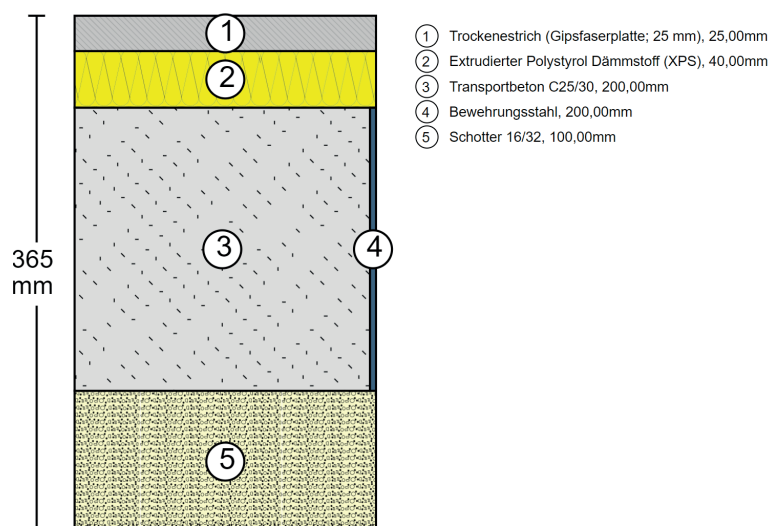
Zufahrt



Außenwand erdberührt



Bodenplatte



Annahmen zu Mengen von Tiefgaragen und Kellern

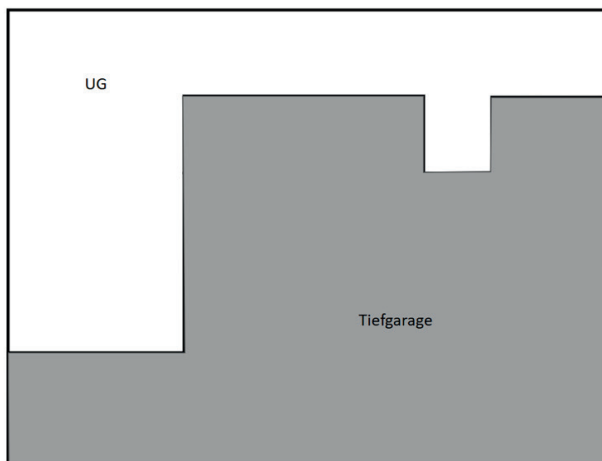
Tiefgaragen

Mengenermittlung aus dem Referenzprojekt "Parklogen München-Schwabing", prash buken partner architekten, https://passivehouse-database.org/#d_5347 (letzter Zugriff: 10.01.25)

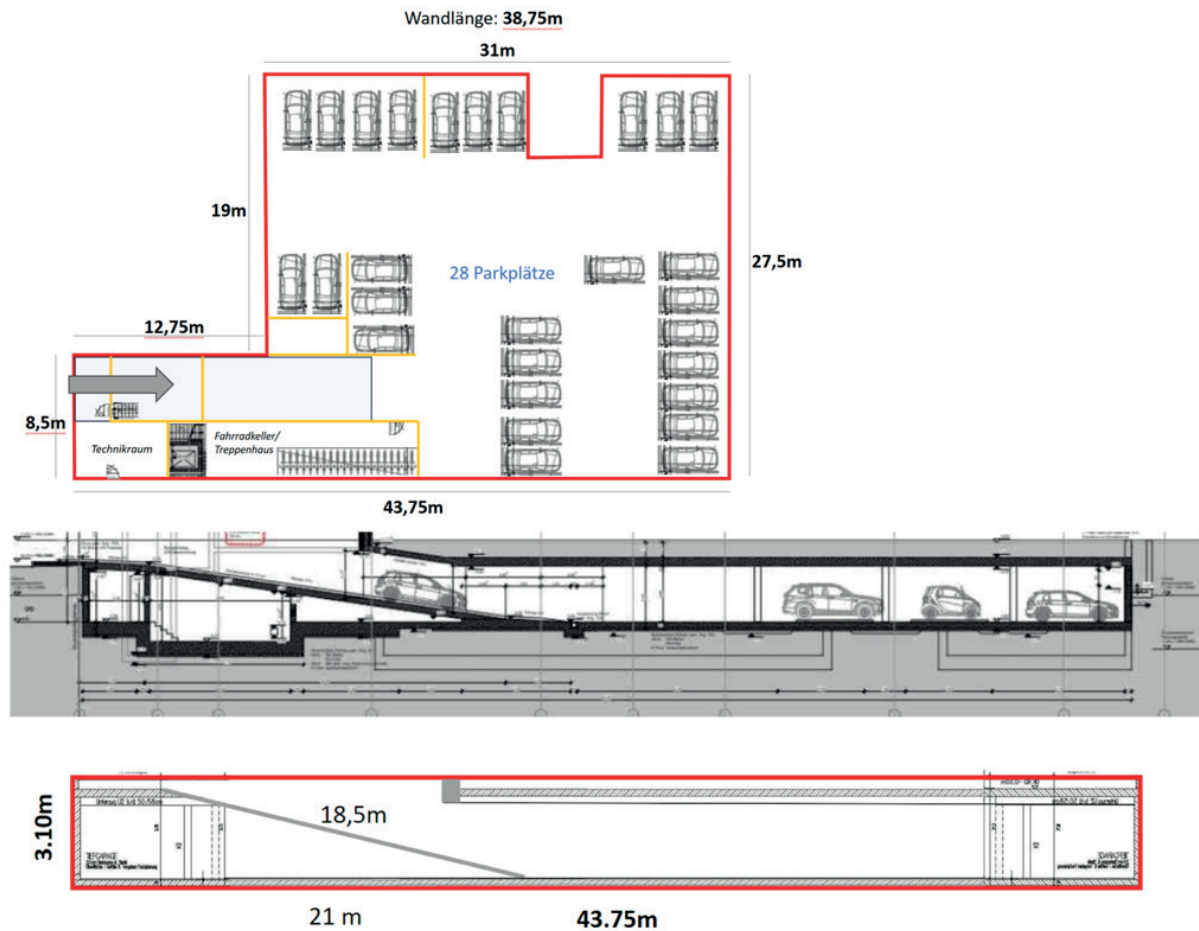
1. Schritt: Ermittlung Stellplatzanzahl (28 Stellplätze)



2. Schritt: Trennung der Tiefgarage und sonstiges Untergeschoss



3. Schritt: Ermittlung der Mengen



Außenwände:	150,25 m
Bodenplatte:	948,38 m ²
Decke:	798,38 m ²
Auffahrt:	170 m ²
Innenwände:	199 m ²
Treppe:	1,5
Aufzugschacht:	23,25m ²
Türen:	3

4. Schritt: Wieviele m² Tiefgarage entfallen auf eine Wohneinheit?

1174 m² Tiefgarage brutto

28 Stellplätze

44 WE im Haus

$1174 \text{ m}^2 / 28 \text{ Stellplätze} = 42 \text{ m}^2/\text{Stellplatz}$

$28 \text{ Stellplätze} / 44 \text{ WE} = 0,63 \text{ Stellplätze}/\text{WE}$

$42 \text{ m}^2 * 0,63 = 26,4 \text{ Tiefgaragen m}^2/\text{WE}$

Puffer -> im Tool werden 30 Tiefgaragen m² (brutto)/WE angenommen

Tiefgaragenfläche= Anzahl WE* 30 m² -> manchmal größer, manchmal kleiner als die Gebäudegrundfläche

Garagen

Garagenfläche kleine Gebäude = Anzahl WE * 15 m²

Keller

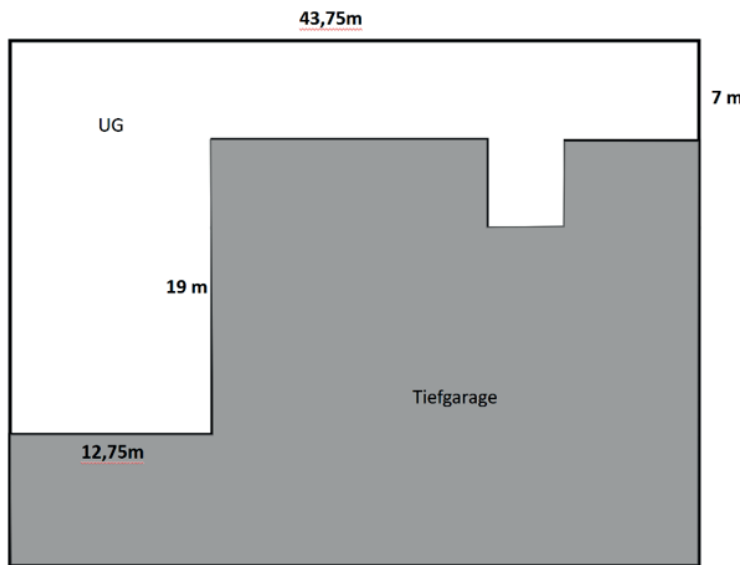
Kellerfläche_{kleine Gebäude} = Grundfläche Gebäude * 0,5

Kellerfläche_{große Gebäude} = Anzahl WE * 12 m²

Herleitung:

Abstellfläche 6 m²/WE -> doppelte Fläche rechnen für mit Verkehrsflächen etc. (12 m²)

Überprüfen am Beispiel:



Fläche UG = (7m*43,75m) + (12,5m*19 m) = **543,75 m²**

44 WE im Haus -> 543,75/44 = **12,35 m² Kellerfläche/WE**

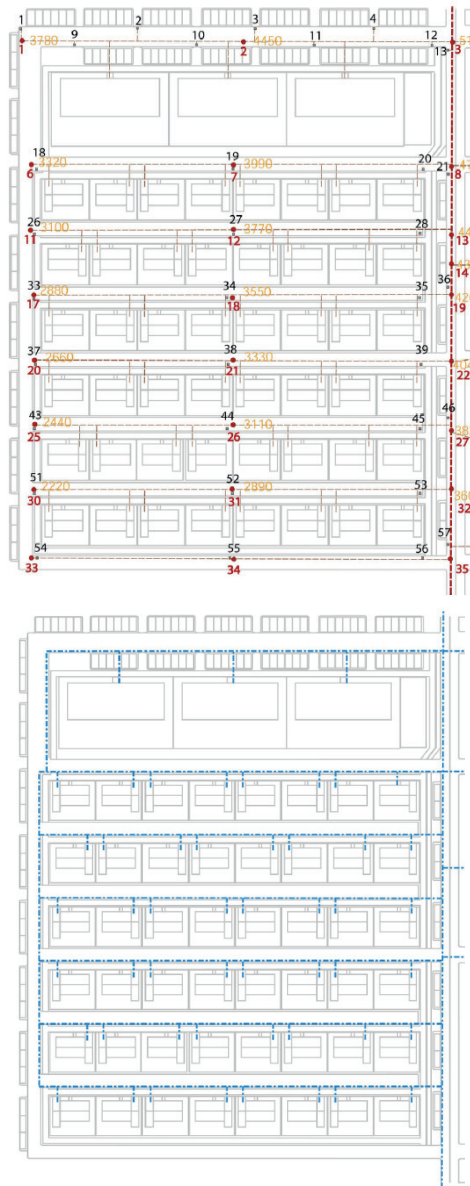
-> getroffene Annahme von 12 m² Keller/WE ist auch anhand des Beispiels plausibel

-> **12 m² Keller/WE in großen Gebäudetypen**

KG 550 - Technische Anlagen

58 Trink-
wasserver-
sorgung
Sammelan-
schluss

0,12 kg CO₂ eq/lm*a



Beispielhafter Verlauf eines Trink- und Abwassernetzes entlang der Straßen innerhalb einer Siedlung (Schuchardt, 2006), vergl. Abbildung 42.

Gemäß der Studie von Schuchardt (2006) wird angenommen, dass Trink- und Abwasserkanäle entlang der Straßen verlaufen. Das Abwassersystem verläuft meist mittig in der Straße und liegt auf der tiefsten Ebene, während Trinkwasserkanäle meist an einer Straßenseite verlaufen. In beiden Systemen versorgen Sammelleitungen mehrere Gebäude gemeinsam, während Hausanschlüsse zu einzelnen Gebäuden führen (Schuchardt, 2006). Sammelleitungen und Hausanschlüsse werden im Modell aufgrund der unterschiedlichen Rohrdicke separat bilanziert. Bei Trinkwasserkanälen wird ein PE-X-Alu Rohr mit einem Rohrdurchmesser von 40mm und eine Rohrdicke von 3,5 mm angenommen. Bei Abwasserkanälen wird ein DIN400 Steingutrohr mit einem Rohrdurchmesser von etwa 400 mm und eine Rohrdicke von etwa 6,5mm angenommen. Schuchardt nimmt bei 1.600 m Anlieger- und 700 m Hauptstraße für ein vergleichbares PEX Trinkwasserrohr einen GWP von etwa 54.600 kg CO₂ eq bei 75 Jahren Lebensdauer an, was einem flächenbezogenen GWP von 0,32 kg CO₂ eq/lm*a entspricht. Ein Äquivalent aus der ÖKOBAUDAT rechnet mit 0,12 kg CO₂ eq/lm*a. Schuchardt nimmt bei 1.600 m Anlieger- und 700 m Hauptstraße für ein vergleichbares Abwasser Steinrohr einen GWP von etwa 354.085 kg CO₂ eq bei 75 Jahren Lebensdauer an, was einem flächenbezogenen GWP von 2,1 kg CO₂ eq/lm*a entspricht. Ein Äquivalent aus der ÖKOBAUDAT rechnet mit 1,02 kg CO₂ eq/lm*a. Für das Modell orientieren wir uns trotz des Unterschieds der Werte an dem deutlich jüngeren Datensatz der ÖKOBAUDAT aus 2023.

59 Abwasser Sammelanschluss	1,02 kg CO ₂ eq/lm*a	vgl. Abschnitt 'Trinkwasserversorgung Sammelanschluss'
60 Quartiers- ebene Strom- versorgung Häuser	0,048 kg CO ₂ eq/lm*a	vgl. Abschnitt 'Quartiersebene Stromversorgung Häuser'
Auf der Quartiersebene wird in allgemeine Stromversorgung, Straßenlicht-, Telefon- und Breitbandkabelversorgung unterschieden. Alle Werte beziehen sich auf die Verlegung des jeweiligen Systems, während der Aushub separat im Modell addiert wird. Schuchardt (2006: 69) ermittelt eine Summe von 39.900 kg CO₂ eq für die allgemeine Stromversorgung eines Quartiers mit 144 WE über 75 Jahre, inklusive der Verlegung (vgl. S. 69). Daraus ergeben sich 3,5 kg CO₂ eq*a/Wohneinheit. Dies entspricht etwa dem GWP von 0,047 kg CO₂ eq/m² NRF*a aus eLCA. Nach demselben Vorgehen wurden für das Telefonkabel 0,034 kg CO₂ eq/m² NRF*a und das Breitbandkabelsystem 0,02 kg CO₂ eq /m² NRF*a ermittelt.		
61 Quartiers- ebene Telefonkabel	0,034 kg CO ₂ eq/lm*a	vgl. Abschnitt 'Quartiersebene Stromversorgung Häuser'
62 Quartiers- ebene Breit- bandkabel	0,02 kg CO ₂ eq/lm*a	vgl. Abschnitt 'Quartiersebene Stromversorgung Häuser'
63 Quartiers- ebene Kabel- kanal	0,185 kg CO ₂ eq/lm*a	vgl. Abschnitt 'Quartiersebene Stromversorgung Häuser'

Weitere Annahmen und Herleitungen von Parametern

Annahmen Fensterflächen

	Kern et al, 2023: Potential alternativer PV-Module in Darmstadt.	LowEx Bestand: Systematische Analyse der Mehrfamilien-Bestandsgebäude (S. 22 f.) im Tool verwendet)	Loga et al, 2005: Entwicklung eines Flächenschätzverfahrens zur Abschätzung von bauteilflächen als Grundlage für die energetische Bewertung von Wohngebäuden (S.109 f.)
EFH	14,96%		EFH freistehend: 0,2 (Einheit = Verhältnis aus Fensterfläche und beheizter Wohnfläche)
DH	22%		Einfamilienhausvariante: einseitig angebaut: 0,198
RH			Einfamilienhausvariante: zweiseitig angebaut: 0,202
PH			Mehrfamilienhausvariante: freistehend: 0,171
ZH			Mehrfamilienhausvariante: zweiseitig angebaut: 0,185
Block		9,4 % bis 17,9 % der Gebäudehüllfläche (durchschn. 12,98% der Gebäudehüllfläche (Gebäudehülle inkl. Dachfläche) ohne Dachfläche: (hier evtl verfälscht durch eingerechnete Dachfenster)): 22,8%	Mehrfamilienhausvariante: zweiseitig angebaut: 0,185
Allg.			Richtung Norden durchschnittlich am wenigsten Fensterfläche

Herleitung Gebäudeenergiekennwerte

Projekt:	Einheit	Hellinghöfe_Riegel	König-Studie_15kWh	König-Studie_30kWh
Gebäudetyp		Zeile	EFH	EFH
Ort:		Mainz-Kastel	-	-
Datenquelle:		EnEV-Nachweis	König-Studie	König-Studie
Datum:		2021	-	-
Gebäudehüllfläche	m ²	7.064	400	400
Gebäudevolumen	m ³	20.345		
Beheiztes Luftvolumen	m ³	16.276	550	550
Gebäudenutzfläche	m ²	6.511		
A/Ve-Verhältnis	1/m	0,35	0,7	0,7
Fensterfläche	m ²	1.191		
Fensterfläche/Hüllfläche		0,17	0,20	0,20
Jahres-Primärenergiebedarf	kWh/(m ² a)	28		
Gas-Brennwertkessel	kWh/(m ² a)		16,5	45
Holzpellets	kWh/(m ² a)		20	28
Wärmepumpe LW	kWh/(m ² a)		17	32
Jahres-Endenergiebedarf (absolut)				
Erdgas E	kWh	46.177		
Strom-Mix	kWh	65.297		
Hilfsenergie (Strom)	kWh	9.826		

Jahres-Endenergiebedarf bezogen auf Gebäude- nutzfläche AN				
Gas-Brennwertkessel	kWh/m ²		12	38
Holzpellets	kWh/m ²		40	77
Wärmepumpe LW	kWh/m ²		10	18
Erdgas E	kWh/m ²	7		
Strom-Mix	kWh/m ²	10		
Hilfsenergie (Strom)	kWh/m ²	2		
Jahres-Heizenergiebe- darf (absolut)		180.002		
flächenbezogener Jahres- Heizwärmebedarf	kWh/(m ² a)	28	15	30
Transmissionswärmever- luste		2.281		
Wärmebrückenzuschlag 3%		212		
Lüftungswärmeverluste	W/K	3.320,35		
Summe		5.813,64		
Transmissionswärmever- lust	W/(m ² K)	0,35		
Anlagenaufwandszahl eP		0,71		