

Patricia Schneider-Marin, Christina Dotzler  
Christine Röger, Werner Lang, Jens Glöggler  
Klara Meier, Susanne Runkel

## **Design2Eco**

# **Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden – Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen**

F 3137

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0323-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

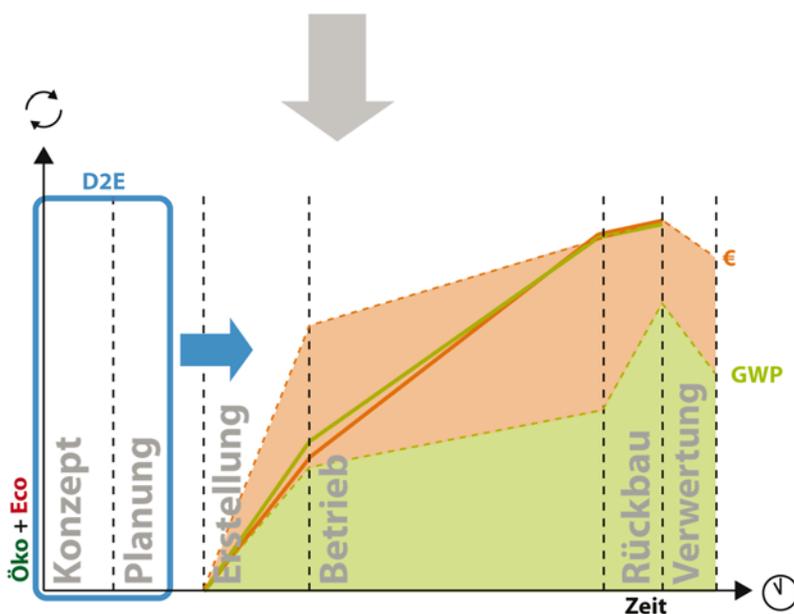
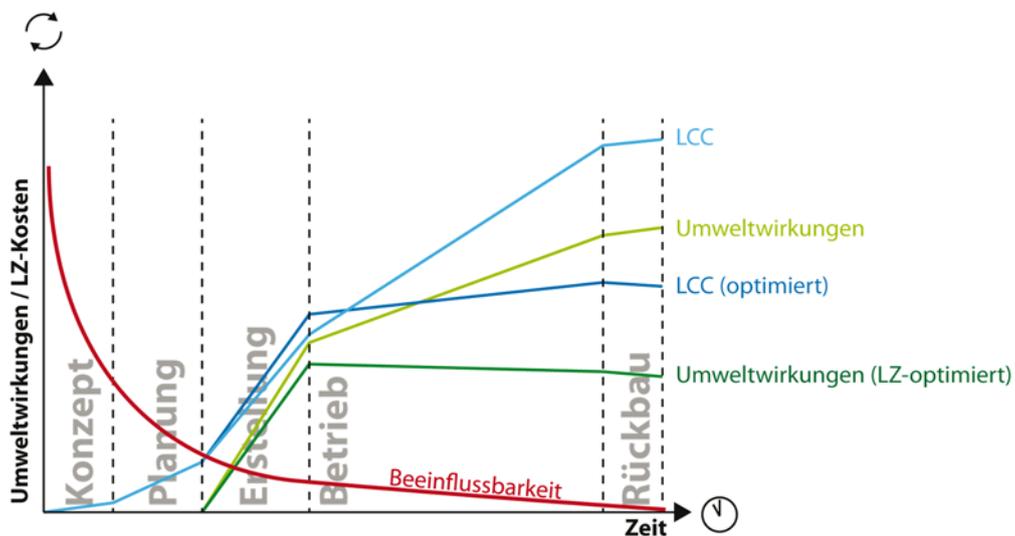
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

## Design2Eco | Schlussbericht

Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von
   
 Büro- und Verwaltungsgebäuden –
   
 Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe
   
 Planungsphasen



**Projektzeitraum:** Januar 2017 - November 2018

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.  
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.60)

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit dieser Veröffentlichung wird die männliche Sprachform verwendet. Sämtliche Ausführungen gelten natürlich in gleicher Weise für die weibliche.

# Impressum

München, 30.11.2018



Technische Universität München  
Fakultät für Architektur,  
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für energieeffizientes und nach-  
haltiges Planen und Bauen  
(Prof. Dr.-Ing. Werner Lang)  
Arcisstraße 21  
80333 München



ATP sustain GmbH  
Karlstraße 66  
80335 München

## **Autoren**

TUM

Dipl.-Ing. Patricia Schneider-Marin

Dipl.-Ing. (FH) Christina Dotzler, M. Eng.

Dipl.-Ing. Christine Röger

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

ATP sustain

Dipl.-Ing. Jens Glöggler

Klara Meier, M. Eng.

Prof. Dipl.-Ing. Susanne Runkel

## **Studentische Mitarbeiter**

Thomas Heiß, M.Sc.

Eva von der Hagen, M.Sc.

Tobias Stoiber, M.Sc.

Elisabeth Faßbender, M.Sc.

## **Betreuer Zukunft Bau**

Dr.-Ing. Michael Brüggemann

## **Langfassung Titel**

Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden  
Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AP</b>	Acidification Potential of Land and Water (Versauerungspotential)
<b>ADP</b>	Abiotic Resource Depletion Potential (Potential für den Abbau von abiotischen Ressourcen)
<b>BGF</b>	Bruttogrundfläche (gem. DIN 277-1:2005-02)
<b>BNB</b>	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
<b>DGNB</b>	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
<b>eLCA</b>	„eLCA“-Onlinetool für die Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenberechnung (Hrsg.: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung)
<b>EnEV</b>	Energieeinsparverordnung
<b>EP</b>	Eutrophication Potential (Eutrophierungspotential)
<b>EPD</b>	Environmental Product Declaration (Umweltproduktdeklaration)
<b>GWP</b>	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
<b>HLSE</b>	Heizung Lüftung Sanitär Elektro
<b>HOAI</b>	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung)
<b>LCC</b>	Life Cycle Costing (Lebenszykluskostenberechnung)
<b>LPH</b>	Leistungsphasen (nach HOAI)
<b>LZK</b>	Lebenszykluskosten
<b>LZKG</b>	Lebenszykluskostengruppe
<b>LZPH</b>	Lebenszyklusphase
<b>NGF</b>	Netto-Grundfläche (gem. DIN 277-1:2005-02)

---

<b>KG</b>	Kostengruppe (gem. DIN 276-1:2008-12)
<b>ODP</b>	Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotential)
<b>PE</b>	Primärenergie
<b>PENRM</b>	Nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung
<b>PENRT</b>	Nicht erneuerbare Primärenergie, total
<b>PERT</b>	Erneuerbare Primärenergie, total
<b>POCP</b>	Photochemical Ozone Creation Potential (Photooxidantienbildung, Potential für die Bildung von troposphärischem Ozon)
<b>ROI</b>	Return of Invest
<b>TGA</b>	Technische Gebäudeausrüstung

---

## Glossar

<b>Bauteile</b>	Zusammensetzung von Bauteilkomponenten; entspricht der 2. Ebene der DIN 276 (zum Beispiel „Außenwände“).
<b>Bauteilkomponente</b>	Eine oder mehrere Schicht/-en eines Bauteils; entspricht der 3. Ebene der DIN 276 (zum Beispiel „Außenwandbekleidungen außen“).
<b>Differenzbetrachtung</b>	In der Differenzbetrachtung werden zwei oder mehr Varianten in Bezug auf die absoluten oder relativen Unterschiede untersucht und ausgewertet. Durch diese Methode können zwei Alternativen gegeneinander bewertet werden.
<b>Erzeugernutzwärme/-kälte</b>	Die Summe der zur Deckung des Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasserbereitung jährlich benötigten Wärmemenge bzw. der zur Deckung des Kältebedarfs für Raumkühlung jährlich benötigten Kältemenge, jeweils einschließlich des thermischen Aufwands für Übergabe, Verteilung und Speicherung (EEWärmeG, 2015).
<b>Graue Energie</b>	Kumulierter Aufwand an nicht erneuerbaren energetischen Ressourcen für die Herstellung und Entsorgung eines Baustoffs inkl. aller vorgelagerten und nachgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Transport-Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse sowie Entsorgung, inkl. der dazu notwendigen Hilfsmittel (SIA, 2010).
<b>Funktionale Kategorie</b>	Zusammenfassung von Bauteilen der 3. Ebene zu Kategorien mit Eigenschaften (zum Beispiel Tragwerk, Innenausbau, Fenster und Türen, etc.); vgl. Abbildung 3-3
<b>Ökobilanz</b>	(auch: Life Cycle Assessment, LCA) Zusammenstellung und Beurteilung der Input-und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges (DIN EN ISO 14040:2009-11)
<b>Primärenergie</b>	Die Primärenergie (PE) oder Rohenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden. (VDI, 2012)

---

**Strategische Parameter**

Als strategische Parameter werden hier Projektparameter angesehen, die einen wesentlichen Einfluss auf die ökologische und/oder ökonomische Gesamtbilanz des Gebäudes nehmen. Eine detailliertere Beschreibung möglicher Eigenschaften kann Kapitel 1.1.3 entnommen werden.

**Systemgrenze**

Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind (DIN EN ISO 14040:2009-11)

---

## Kurzzusammenfassung

Die Planung von Gebäuden befindet sich seit der Einführung des Nachhaltigkeitsgedankens in das Bauwesen in einem Wandel. Zu den klassischen Anforderungen an Funktionalität, bautechnische Qualität und Ästhetik kommen Energieeffizienz, Ressourcenschonung und die Sicherstellung der Lebensgrundlagen für zukünftige Generationen hinzu. Die entscheidenden Weichen für die Optimierung dieser vielfältigen Ziele werden bereits in frühen Planungsphasen gestellt. Allerdings sind zu diesem Zeitpunkt meist keine lebenszyklusbasierten Informationen über die ökonomischen und ökologischen Qualitäten des Gebäudes verfügbar.

Daher entwickelt das Forschungsprojekt „Design2Eco – Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden: Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen“ am Beispiel von Bürogebäuden im Neubau eine einfache Systematik zur parallelen Abschätzung von Umweltwirkungen und Kosten über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Ziel ist es, den am Bau Beteiligten eine Entscheidungsgrundlage in frühen Planungsphasen zur Verfügung zu stellen.

Zunächst werden für fünf fertiggestellte Beispielprojekte, die jeweils mindestens den Energiestandard der EnEV 2009 erfüllen, detaillierte Lebenszykluskostenberechnungen und Ökobilanzen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse werden wichtige Stellschrauben als „strategische Parameter“ identifiziert. Um die Signifikanz verschiedener Parameter, wie zum Beispiel die Länge des Betrachtungszeitraumes, die Bedeutung der Energieerzeuger oder unterschiedlicher Bauteilaufbauten zu zeigen, werden Variantenstudien durchgeführt. Sowohl Ökobilanz als auch Lebenszykluskosten werden in Kostengruppen und funktionale Kategorien gegliedert. Unter den funktionalen Kategorien kristallisiert sich für die Ökobilanz das Tragwerk als ausschlaggebend heraus, während die Lebenszykluskosten am meisten durch den Innenausbau und die damit verbundenen Austausch- und Reinigungskosten beeinflusst werden.

Es wird eine Methodik für frühe Planungsphasen entwickelt, die durch die Bewertung weniger Regelbauteile in Kombination mit den projektspezifischen Flächenberechnungen der Bauteile in der zweiten Kostengruppenebene nach DIN 276-1:2008-12 eine vergleichende Hochrechnung erlaubt. Diese wird anhand der durchgeführten detaillierten Berechnungen validiert und auf ein laufendes Fallbeispiel angewendet. Hier zeigt sich, dass durch die Auswahl entsprechender Bauteile 22 % des Treibhauspotenzials der Konstruktion eingespart werden können, ohne dass dabei Mehrkosten über den Lebenszyklus entstehen.

Abschließend werden, abhängig von strategischen Gebäudemerkmale, vereinfachte Handlungsempfehlungen für die Planung zur Verfügung gestellt. Die Entscheidungen in frühen Phasen des Planungsprozesses, die den größten Einfluss auf die ökologische und ökonomische Gesamtbilanz haben, sind die Wahl der Energieversorgung und des Dämmstandards, die Wahl des Baumaterials für das Tragwerk und die Wahl des Innenausbaukonzeptes.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Bewertung der End-of-Life Phase in der Ökobilanz und für die Lebenszykluskosten. Große Datenlücken werden hinsichtlich der ökologischen und ökonomischen Bewertung der Gebäudetechnik und damit zusammenhängend der Betriebsphase des Gebäudes festgestellt.

---

## Abstract

Building design is changing due to new considerations regarding the sustainability of the construction industry. In addition to traditional requirements such as functionality, quality of the construction or aesthetics, now projects have to take energy efficiency, safeguarding natural resources and ensuring the livelihood for future generations into account. The decisions that have the greatest influence on the optimization of these various goals are taken in the early design phases of buildings. However, at this stage of the design information about the building's economic and ecological quality for its entire life cycle is generally not available.

Therefore the research project „Design2Eco – Life Cycle Considerations in the design process of office and administration buildings: basis for decisions and optimization potential for early planning phases“ develops a simple system to estimate simultaneously environmental impacts and costs throughout the life cycle of buildings. The project aims to provide stakeholders with a basis for decisions in early design phases.

As a first step, life cycle costs and life cycle environmental indicators are calculated in detail for five completed sample projects, which fulfil at least the energy performance standard EnEV (energy saving ordinance) of 2009. The most influential factors are derived from these calculations and identified as “strategic parameters”. To further analyse the importance of the calculation framework, the overall results are calculated for the variation of parameters such as the length of the considered life cycle period, energy supply for the operation period and a range of materials for important building parts. Both life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) are categorized into cost groups (following DIN 276) and into functional units (structure, interior fit-out, façade etc.). Amongst the functional units the building's structure is found to be the most significant part for the life cycle assessment whereas the interior fit-out with its costs for cleaning and exchanging materials has the highest impact on life cycle costs.

Following this analysis, a methodology for early planning phases is developed, which allows a comparison of various options. The results of LCA and LCC calculations for a small number of building parts is multiplied with their respective total area to forecast the results of detailed calculations. This forecast method is validated using the detailed calculations of the five sample projects. Subsequently, the method is applied to a sample building which is currently being designed. It is shown that by selecting building parts with a low global warming potential (GWP), the overall GWP of the building's construction can be reduced by 22% without increasing the life cycle costs.

Summarizing the results from the previous analyses, simplified recommendations for early design phases are developed dependent on strategic building characteristics. Generally, the choice of energy supply and energy performance standard, the choice of materials for the building's structure, and of the concept for the interior fit-out have the greatest influence on the overall economic and ecological performance.

Further research is required on the evaluation of the end of life phase of buildings both for LCC and LCA. A significant lack of data for the building's MEP and HVAC systems' economic and ecological performance and hence also for the building operation is identified.

---

## Inhalt

Impressum.....	III
Abkürzungsverzeichnis .....	IV
Glossar .....	VI
Kurzzusammenfassung.....	VIII
Abstract .....	IX
Inhalt .....	X
1 Einleitung .....	1
1.1 Projektziel.....	1
1.2 Methodische Vorgehensweise und Aufbau des Projektes .....	4
2 Stand der Forschung und Ausgangssituation des Projektes .....	7
2.1 Kennwerte und Handlungsempfehlungen für frühe Planungsphasen.....	7
2.2 Bewertungsmethoden .....	9
3 Definition der projektspezifischen Rahmenbedingungen.....	15
3.1 Notwendige Projektinformationen .....	15
3.2 Systemgrenzen .....	17
3.3 Randbedingungen und Bewertungstools .....	20
3.4 Auswertung und Darstellungsweisen .....	23
4 Beschreibung der Beispielprojekte .....	25
4.1 Getroffene Annahmen zugunsten der Vergleichbarkeit .....	26
4.2 Vorstellung der Beispielprojekte.....	26
4.3 Zusammenfassung der Projekteigenschaften.....	29
5 Projektergebnisse .....	31
5.1 Ergebnisse der LCA .....	31
5.2 Ergebnisse der LCC.....	46
5.3 Eco-Costs und externe Kosten der Projekte .....	60
6 Detailuntersuchungen und Variantenstudien.....	63
6.1 Differenzbetrachtung Lebensdauer Gesamtgebäude Projekt A.....	63
6.2 Differenzbetrachtung Lebensdauer Teilbereich Projekt A.....	65
6.3 Detaillierte Berechnung der TGA Projekt A.....	75
6.4 Energieversorgung.....	77
6.5 Bauteilvarianten aus den Projekten A, C und E.....	85

---

6.6	Fazit .....	99
7	Entwicklung einer Strategie für frühe Planungsphasen .....	103
7.1	Anteil der funktionalen Kategorien an der Gesamtbilanz .....	103
7.2	Methodik zur Hochrechnung der KG 300 .....	107
7.3	Fallbeispiel Projekt X .....	114
7.4	Strategische Parameter .....	124
7.5	Handlungsempfehlungen .....	129
8	Fazit und Ausblick .....	135
8.1	Fragestellungen und Forschungshypothesen .....	135
8.2	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	136
8.3	Weiterer Forschungs- bzw. Untersuchungsbedarf .....	138
	Abbildungsverzeichnis .....	142
	Tabellenverzeichnis .....	146
	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	148
	Anhang .....	155
	A1 – Gebäudesteckbriefe .....	155
	A1.1 Projekt A .....	156
	A1.2 Projekt B .....	158
	A1.3 Projekt C .....	160
	A1.4 Projekt D .....	162
	A1.5 Projekt E .....	164
	A2 – Übersicht Regelaufbauten Projekte A,C und E .....	166
	A3 – Bauteilaufbauten Projekt X .....	168

---

# 1 Einleitung

Die Planung von Gebäuden befindet sich seit der Einführung des Nachhaltigkeitsgedankens in das Bauwesen in einem Wandel. Zu den klassischen Anforderungen an Funktionalität, bautechnische Qualität und Ästhetik kommen Energieeffizienz, Ressourcenschonung und die Sicherstellung der Lebensgrundlagen für zukünftige Generationen hinzu. Die entscheidenden Weichen für die Optimierung dieser vielfältigen Ziele werden bereits bei der Grundlagenermittlung und im Vorentwurf gestellt.

Bei weitgehender Optimierung der Betriebsphase eines Gebäudes muss sich der Fokus energetischer, ökologischer und ökonomischer Fragestellungen auf die übrigen Lebenszyklusphasen des Gebäudes verschieben: Zwar ist der Betriebsenergiebedarf immer noch maßgebend, jedoch steigt der Anteil an "grauer" Energie und "grauen" Umweltwirkungen an. Um eine ausgeglichene Optimierung des gesamten Lebenszyklus zu erreichen, besteht Forschungsbedarf bei der Einschätzung dieser "grauen" Anteile an Energiebedarf und Umweltwirkungen für frühe Planungsphasen. Bei einer ökonomischen Betrachtung stehen allerdings derzeit die Investitionskosten, d.h. die Lebenszyklusphase der Erstellung, im Vordergrund. Folgekosten werden für Planungsentscheidungen nur in wenigen Fällen mit einbezogen.

Begründet liegt dies in einer schlechten Datenverfügbarkeit in frühen Planungsphasen. Darüber hinaus wird derzeit eine durch das in diesem Bericht beschriebene Prinzip gesteigerte Qualität nicht in einer Immobilienbewertung so transparent erfasst und finanziell beurteilt, dass sich bei Verkauf eine ggf. erfolgte höhere Investition im Immobilienwert abbildet und dadurch wenig Anreiz für einen Erstinvestor bietet diese zu tätigen.

Um auf der bestmöglichen Grundlage entscheiden zu können, ist es unerlässlich, schon zu einem frühen Zeitpunkt Informationen über Umweltwirkungen und Kosten in allen zukünftigen Lebensphasen des Gebäudes zu besitzen. Derzeit sind allerdings weder ökologische Wirkungen noch die ökonomische Qualität eines Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus im Planungsprozess verankert. Berechnungen im Nachgang leisten einen eingeschränkten Beitrag zur Optimierung. Nur in wenigen Ausnahmen wird eine ausführliche Variantenuntersuchung nach festen Vorgaben durchgeführt, wie bei dem Zertifizierungssystem BREEAM oder seit der Version 2018 bei der DGNB.

## 1.1 Projektziel

Aus diesem Grund entwickelt das vorliegende Forschungsprojekt

**„Design2Eco – Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden: Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen“**

am Beispiel von Bürogebäuden im Neubau eine einfache Systematik zur parallelen Abschätzung von Umweltwirkungen und Kosten über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Damit soll den am Bau Beteiligten eine Entscheidungsgrundlage in frühen

Planungsphasen zur Verfügung gestellt werden. Es soll verdeutlicht werden, welche Entscheidungen gerade in den frühen Phasen (z.B. Vorentwurf) die relevantesten Stell-schrauben für die Umweltwirkungen und die Lebenszykluskosten darstellen.

### 1.1.1 Fragestellungen

Zusammenfassend sollen im vorliegenden Forschungsvorhaben am Beispiel von Büro- und Verwaltungsgebäuden jüngerer Datums (ab Inkrafttreten der EnEV 2009) primär folgende Fragestellungen behandelt werden:

- Welche Entscheidungen in frühen Phasen des Planungsprozesses (Grundlagen-genermittlung, Vorentwurf) haben signifikanten Einfluss auf die ökologische und welche auf die ökonomische Gesamtbilanz eines Gebäudes?
- Wie können nachvollziehbare praxisnahe Entscheidungsgrundlagen zur Abschätzung der langfristigen Qualität verschiedener Gebäudevarianten geschaffen werden?
- Wie können die Lebenszykluskosten mit den Umweltwirkungen von Gebäudevarianten zusammengeführt werden, um beide Kriterien schon in frühen Planungsphasen parallel zu optimieren?
- Wie kann die entwickelte Systematik durch Erfahrungen aus laufenden Projekten kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert werden?

### 1.1.2 Forschungshypothesen

Auf Basis der Forschungsziele werden zwei Hypothesen formuliert:

1. In der **systematischen Information des Planungsprozesses** liegt großes Potential, die ökologische und ökonomische Qualität für den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu verbessern.
2. Die **Identifikation strategischer Parameter** im Zusammenspiel mit der Berechnung der mit ihnen verbundenen Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen erlaubt es, die gesamten Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen von Gebäudeprojekten schon in frühen Planungsphasen mit hinreichender Genauigkeit abzuschätzen und Verbesserungsvorschläge zu evaluieren.

Ziel ist die Identifizierung von strategischen Gebäudeteilen und Entscheidungen mit maßgeblichem Einfluss auf die ökologische und/oder ökonomische Gesamtbilanz. Letztlich sollen nachvollziehbare und praxisnahe Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Planung und der langfristigen Qualität verschiedener Gebäudevarianten entwickelt werden. Die engere Zusammenführung der Lebenszykluskosten und der Umweltwirkungen macht eine Weiterentwicklung der Bewertungssystematik erforderlich. Unterstützt wird dies durch die Erfahrungen des Praxispartners aus laufenden Projekten.

### 1.1.3 Identifizierung strategischer Parameter

Grundlage für die Identifizierung von Optimierungspotentialen in frühen Planungsphasen ist die Definition strategischer Parameter. Der Begriff „Parameter“ ist hier bewusst weit gefasst: Dabei kann es sich beispielsweise um die Energieversorgung, die Kompaktheit eines Gebäudes, die Tragwerksmaterialität oder die Aufbauten von Regelbauteilen handeln. Strategisch werden Projektparameter, wenn ihre Ausprägungen einen wesentlichen Einfluss auf die ökologische und/oder die ökonomische Gesamtbilanz eines Gebäudes nehmen. Dies kann sich aus einem oder mehreren der folgenden Kriterien ergeben:

Ein Parameter...

- tritt im Projekt mit einer hohen Quantität auf. Dies können z.B. bestimmte Bauteile sein, die – abhängig von der Gebäudegeometrie – große Flächenanteile innehaben.
- kumuliert sich während der Nutzungsphase, wie z.B. der Energieverbrauch des Gebäudebetriebs. Auch hohe Austauschzyklen einer Bauteilschicht können zu einem hohen Massenkennwert und somit einer strategischen Bedeutung führen.
- weist einen hohen spezifischen Kennwert in der LCA auf, indem er einen oder mehrere ökobilanzielle Datensätze beinhaltet, die hohe Kennwerte bei Umweltwirkungen und/oder Ressourcenverbräuche aufweisen.
- hat einen hohen spezifischen Kennwert in der LCC, indem er ein Kostentreiber in der Herstellung ist oder auch eine kostenintensive Nutzungsphase, z.B. durch einen hohen Reinigungs- oder Instandhaltungsaufwand nach sich zieht.

Im Unterschied zur Untersuchung von Balck (2012) wird hier der Fokus auf die Optimierung in frühen Phasen der Planung gelegt. Dies können folglich nur diejenigen der ermittelten Parameter sein, die auch Gegenstand früher Planungsentscheidungen sind. Dies bedingt zudem, dass sie prinzipiell durch Planungsentscheidungen beeinflussbar sind, also nicht durch Rahmenbedingungen vordefiniert sind und zudem alternative Optionen, wie z.B. andere Ausführungsvarianten bieten.

Insbesondere die Flächenanteile von Bauteilen und Massen der verwendeten Baustoffe sind sehr dynamisch bzw. entwurfsabhängig und werden durch frühe Planungsentscheidungen im Wesentlichen festgelegt. So ergeben sich die Bauteilflächen und somit die strategische Bedeutung von Regelbauteilen wie z.B. Außenwänden, Decken und Gründung bereits aus grundlegenden Entwurfsentscheidungen über Kubatur, Kompaktheit oder Geschossigkeit eines Baukörpers. Diese Zusammenhänge werden untersucht und systematisch dargestellt.



Abbildung 1-1: Gegenseitige Beeinflussung und Abhängigkeiten exemplarischer Projektparameter (eigene Darstellung)

## 1.2 Methodische Vorgehensweise und Aufbau des Projektes

Nachfolgend werden die Arbeitspakete zur Umsetzung der Projektziele und Fragestellungen vorgestellt. Ferner wird erläutert, welche Werkzeuge dafür eingesetzt werden (vgl. Abbildung 1-2).

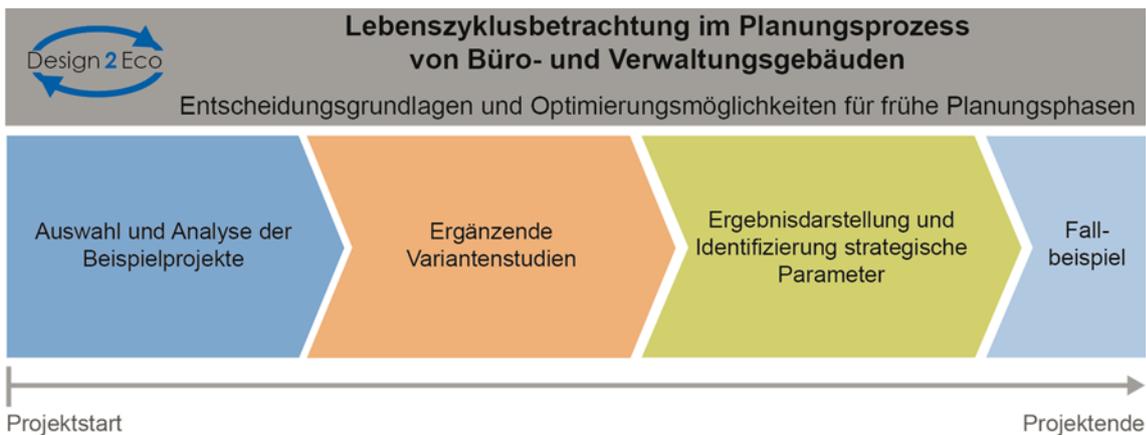


Abbildung 1-2: Arbeitspakete des Forschungsprojektes (eigene Darstellung)

### 1.2.1 Auswahl und Analyse der Beispielprojekte

Nachdem eine Literaturrecherche über den Stand bisheriger Untersuchungen geführt wurde (Kap. 2), werden aus abgeschlossenen Projekten der ATP sustain GmbH fünf Beispielgebäude ausgewählt (vgl. Kap. 4). Hierzu werden zunächst wichtige Auswahlkriterien und notwendige Projektinformationen definiert (Kap. 3.1), um im Anschluss eine detaillierte Ex-Post-Analyse der Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen der Gebäude durchführen zu können (Kapitel 5).

Für Büro- und Verwaltungsgebäude im Neubau werden kritische bzw. maßgebende Bauelemente für Lebenszykluskosten und lebenszyklusbasierte Umweltein- bzw. Umweltauswirkungen festgestellt. Ebenso wird die Monetarisierung von Umweltwirkungen

als Bewertungsmethode für den direkten Vergleich mit den Lebenszykluskosten untersucht (Kapitel 5.3). Die Analyse erfolgt zunächst in Abhängigkeit definierter projektspezifischer und standardisierter Systemgrenzen und Rahmenbedingungen, denn die spätere Ergebnisbewertung ist stark von den berücksichtigten Lebenszyklusphasen, den Gebäudekomponenten sowie den Bilanzierungsregeln abhängig (Kap.3.2 und 3.3).

### 1.2.2 Ergänzende Variantenstudien

Ergänzend zu der Analyse der Beispielprojekte unter Standardbedingungen werden in Kapitel 6 weitere Variantenstudien diskutiert. Es wird untersucht, welchen Einfluss Lebens- und Nutzungsdauern nehmen können (Kapitel 6.1 und 6.2). Die Erhebungstiefe beeinflusst die Ergebnisse (Kapitel 6.3), wie auch die Wahl der Energieversorgung (Kapitel 6.4). Die Variantenstudien münden zudem in einer Gegenüberstellung von Bauteilvarianten, um nicht nur gebäudebezogene, sondern auch bauteilbezogene Ergebniseinflüsse zu visualisieren (Kapitel 6.5). Als kritische funktionale Kategorien oder strategische Parameter in frühen Planungsphasen werden letztendlich jene Gebäudeparameter gesehen, die variantenübergreifend als maßgebend identifiziert werden.

### 1.2.3 Ergebnisdarstellung und Identifizierung strategischer Parameter

Aus den Projektergebnissen und Variantenstudien resultiert die Entwicklung einer Strategie für frühe Planungsphasen. Die identifizierten strategischen Parameter werden in Kapitel 7.1 vorgestellt. Die Projektergebnisse werden zusammenfassend visualisiert.

Zudem wird eine Hochrechnungsmethode für LCA und LCC in frühen Planungsphasen entwickelt (Kapitel 7.2). Denn eine frühe Hochrechnung wird benötigt, um Optimierungspotentiale früh identifizieren zu können und Verbesserungsstrategien im weiteren Planungsprozess umsetzen zu können. Zeitaufwendige Studien sind dadurch nicht erforderlich. Zunächst werden die Ergebnisse der vereinfachten Hochrechnung mit der detaillierten Projektberechnung verglichen, um zu sehen, ob sie hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Anschließend dient diese Methode zur Differenzbetrachtung verschiedener Bauteilausführungen der KG 300 am Fallbeispiel „Projekt X“. Dabei werden unter den gleichen Randbedingungen verschiedene Ausführungsvarianten berechnet. Indem der Fokus auf die Ausgabe der Differenz zwischen verschiedenen Varianten gerichtet wird, werden unvermeidliche Ungenauigkeiten in der Berechnung nahezu irrelevant, da sie in beiden Varianten in gleichem Maße wirken. Die ökologische und ökonomische Qualität der verschiedenen Ausführungen werden verglichen. Die Differenz als Maß einer erzielbaren ökologischen/ ökonomischen Verbesserung stellt das Potential von Optimierungen dar.

Letztlich münden alle Untersuchungen in den Handlungsempfehlungen für frühe Planungsphasen (Kapitel 7.4). Ziel ist es, Stellschrauben der LCA und LCC kurz und prägnant gegenüberzustellen und ein Handlungsschema für am Bau beteiligte Personen – Planer und Bauherren – zu entwickeln.

#### 1.2.4 Fallbeispiel

Anschließend wird die Anwendbarkeit der Hochrechnungsmethode an einem Fallbeispiel geprüft (Kapitel 7.3). Zum Zeitpunkt des Forschungsprojektes befindet sich das Beispielprojekt in den Leistungsphasen 1 bis 3 nach HOAI. Durch die enge Verknüpfung mit den Planungstätigkeiten des Projektpartners ATP sustain wird zudem die Anwendung der erarbeiteten Optimierungsstrategien ermöglicht und ihre Umsetzbarkeit in der Planungspraxis sichergestellt.

## 2 Stand der Forschung und Ausgangssituation des Projektes

Zunächst erfolgt die Einordnung der Projektziele in den Stand der Forschung zu derzeitigen ökologischen und ökonomischen Bewertungsmethoden bzw. zu verwandten Forschungsprojekten.

### 2.1 Kennwerte und Handlungsempfehlungen für frühe Planungsphasen

Es existieren bereits einzelne Studien und Forschungsergebnisse zu Ökobilanzierungen und Lebenszykluskostenanalysen in frühen Planungsphasen. Jedoch sind die Datengrundlagen sehr unterschiedlich und die direkte Übertragung der Ergebnisse auf andere Forschungsprojekte bzw. ihr Vergleich gestaltet sich schwierig. Trotzdem bieten sie interessante methodische Ansätze, die nachfolgend vorgestellt werden.

#### 2.1.1 Orientierungswerte für die Bewertung von Hochbauten - Bürogebäude

König (2008) stellt Orientierungswerte für die ökologische und ökonomische Lebenszyklusbilanz von Bürogebäuden zur Verfügung. Die Ökobilanzierung erfolgt auf der Datengrundlage von Ecoinvent 2.0 und teilweise GEMIS. Die Lebenszykluskostenanalyse erfolgt mit den Baukostenkennwerten, die in der Software Legep hinterlegt sind (Legep, o.J.).

Die Studie gibt Einblicke in die Entwicklung von einheitlichen Rechenregeln, Indikatorenansätzen und Bezugsgrößen für LCA und LCC. Unabhängig von den Sachbilanzdaten und den Systemgrenzen geht hervor, dass Bezugsgrößen, wie NGF und BGF klar zu definieren sind und Kostengruppen gebildet werden müssen. Dies wird in vorliegender Arbeit aufgegriffen: die Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenanalyse erfolgt nach einer einheitlichen Struktur.

Die ökologische Datenbank Ecoinvent ist mittlerweile in der Version 3.5 erhältlich und beinhaltet neben regionalen Datensätzen globale und generische Daten. Die Ecoinvent stellt neben Produktdatensätzen spezifische Prozessdatensätze zur Verfügung (Ecoinvent, o.J.). Zwar sind globale bzw. generische Daten für einen überregionalen Vergleich wünschenswert und zu bevorzugen, allerdings ist der Erwerb und somit die Nutzung der Datenbank kostenpflichtig. Um die Transparenz der Projektergebnisse und die freie Zugänglichkeit auf die Datengrundlagen sicherstellen zu können, wird in der vorliegenden Forschungsarbeit auf die Ökobaudat zurückgegriffen, die vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat kostenlos zur Verfügung gestellt wird (BMI, o.J.).

Auf Grund der Verwendung einer anderen Datenbank, abweichender Berechnungsgrundlagen und Systemgrenzen ist ein direkter Ergebnisvergleich („Benchmarking“)

der Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes mit den Ergebnissen dieser Studie nicht durchführbar.

### 2.1.2 Vergleich vereinfachter und detaillierter Rechenverfahren der Ökobilanzierung

Forschungsergebnis von Pohl (2014) ist unter anderem die Feststellung, dass bei der Kostengruppe der Baukonstruktionen die Unterschiede zwischen der Ökobilanzierung nach dem vereinfachten Verfahren und dem vollständigen Verfahren des Bewertungssystems des BNB gering sind bzw. die Abweichungen nicht den Aufschlag mit dem Sicherheitsfaktor von 10 % übersteigen. Ein pauschaler Aufschlag für die Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung scheint jedoch unzureichend zu sein. Die DGNB hat hier aktuell in ihren Bilanzierungsvorgaben den Zuschlag von 10 % auf 20 % angehoben (DGNB, 2018). Auch dieser Wert und die dahinter liegende Berechnungsmethode werden nicht nur für Bürogebäude als unzureichend angesehen (Weißenberger, 2016), weshalb im Zuge der weiteren Arbeit mit Hilfe eines Referenzprojektes detailliert untersucht wird, welche prozentualen Anteile einzelne TGA-Komponenten tatsächlich an den gesamten Umweltwirkungen eines Gebäudes nehmen können. Diese Ergebnisse fließen anschließend in die Handlungsempfehlungen für frühe Planungsphasen ein.

### 2.1.3 Lebenszyklusorientierte Ausschreibung und Vergabe im Hochbau und Investitionsentscheidungen

Eine Studie von Balck (2012) liefert einen methodischen Ansatz: mit Hilfe einer Variantenanalyse werden strategische Kostengruppen und Bauteile über eine Folgekostenindexbewertung ermittelt. Diese Überlegung wird nachfolgend nicht nur auf die Lebenszykluskostenanalyse sondern auch auf die Ökobilanzierung übertragen. Mit Hilfe einer Ex-Post-Analyse von Beispielprojekten werden strategische Kostengruppen und Bauteile für frühe Planungsphasen definiert und ermittelt. Dabei zeigt sich z.B. das Tragwerk als meist nicht strategisch, da es als langlebiges Bauteil im Betrieb nur sehr geringe Nutzungsdauerkosten nach sich zieht. Hingegen zeigen sich Bauteile des Ausbaus, wie Bodenbeläge und flexible Trennwände als strategisch, da sie durch ihren Reinigungsaufwand und oft häufige Umbau-/ Austauschzyklen Kosten im Betrieb nach sich ziehen. Überschlüssig zeigt sich ein Anteil von nur etwa 15-25% der Investitionskosten als strategisch für die LZK-Optimierung.

### 2.1.4 LEKOECS – kombiniertes ökonomisch-ökologisches Gebäudelebenszyklusmodell

Im Projekt „LEKOECS“ (BMVIT, 2014) aus dem Programm „Haus der Zukunft“ wurde ein Excel-basiertes Werkzeug erstellt, das eine parallele ökonomische und ökologische Bewertung von Gebäuden erlaubt. Ein wesentlicher Unterschied zum vorliegenden Forschungsprojekt liegt darin, dass Kosten- und Ökobilanzdaten auf der Grundlage Österreichischer Normen (Bspw. Kostengliederung nach ÖNORM B 1801 vs. DIN 276), Datenbanken (bspw. IBO Richtwertdatenbank vs. OEKOBAUDAT)

und Berechnungsmethoden zusammengestellt wurden und daher für Deutschland nicht nutzbar sind. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt parallel in Lebenszykluskosten, Treibhauspotential und nicht erneuerbarer Primärenergie.

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse des LEKOECOS Anwendungsbeispiels „Bürogebäude AspernIQ“ mit den Ergebnissen des vorliegenden Projektes ist aufgrund des abweichenden Betrachtungszeitraumes (36 Jahre) und der Systemgrenze (nur die thermische Gebäudehülle) nicht möglich. Im LECOECOS Projekt zeigt sich allerdings trotz des kürzeren Betrachtungszeitraumes eine Dominanz der Betriebsphase hinsichtlich der Umweltwirkungen bzw. der Folgekosten hinsichtlich der Lebenszykluskosten, die auch im vorliegenden Projekt bestätigt wird (s. Kapitel 5).

## 2.2 Bewertungsmethoden

Als Grundlage für die Bewertung der Beispielgebäude werden vorhandene Bewertungsmethoden bzgl. Ökologie und Ökonomie auf ihre Tauglichkeit im vorliegenden Projekt untersucht. Daraus ergeben sich die Darstellungen in den darauffolgenden Kapiteln.

### 2.2.1 Ergebnisbewertungen Ökologie

#### 2.2.1.1 Top-Down Bewertungsmethoden

Im vorliegenden Projekt werden Top-Down Methoden für die Bewertung von Ökobilanzen als die Methoden definiert, die auf ein übergeordnetes System Bezug nehmen. Das bedeutet, dass sich Grenzwerte zum Beispiel aus der gesamten Tragfähigkeit bzw. Regenerationsfähigkeit des globalen Ökosystems ableiten.

Im ersten Arbeitspaket wurden als Top-Down-Methoden der Ökologische Fußabdruck (Wackernagel, & Rees, 1997) und die Methode der ökologischen Knappheit (MöK) (Ahbe, Braunschweig, & Müller-Wenk, 1990) untersucht.

Der Ökologische Fußabdruck eignet sich derzeit nicht als Bewertungsmethode für das vorliegende Projekt, da für Gebäude und Bauprodukte keine Daten zum Fußabdruck vorliegen und da für Gebäude keine zur Verfügung stehenden bioproduktiven Flächen festgelegt sind.

Die MöK errechnet für Produkte und Dienstleistungen sogenannte Umweltbelastungspunkte (UBP) in Abhängigkeit der Relevanz der jeweiligen Umweltbelastung, die durch Ökofaktoren auf einen Wert zusammengefasst werden. Eine unmittelbare Anwendung der MöK auf die untersuchten Beispielprojekte ist derzeit leider nicht möglich, da für die meisten der Wirkungsindikatoren nach DIN EN 15804:2014-07, die das Ergebnis der Ökobilanzberechnung bilden, derzeit keine Ökofaktoren für Deutschland vorliegen. Die Fortschreibung einer Datenbank von Ökofaktoren für Deutschland für Wirkungskategorien der Ökobaudat birgt Potential für eine Zusammenfassung von Umweltwirkungen zu einem Wert, ist jedoch nicht Gegenstand dieses Projekts.

### 2.2.1.2 Bottom-Up Bewertungsmethoden

Als Bottom-Up Bewertungsmethoden werden im Rahmen des vorliegenden Projektes die Methoden bezeichnet, die Grenzwerte aus Durchschnittswerten errechnen, um einen Bezug für die Ergebnisbewertung herzustellen. Diese Methoden stützen sich auf den Stand der Technik und definieren durch die Abweichung vom Durchschnitt, wie „gut“ oder „schlecht“ ein Gebäude oder Bauteil ist.

Der Vorteil dieser Methoden ist die vergleichsweise einfache Möglichkeit der Berechnung von Grenzwerten. Die Problematik besteht darin, dass kein Bezug zu übergeordneten Zielen hergestellt werden kann, d.h. es ist unklar, ob ein „guter“ Wert für die Umwelt schädlich ist oder nicht.

Im Zuge der Voruntersuchungen wurden die ReCiPe Points (Goedkoop et al., 2013) und die OI3-Indikatoren (IBO, 2016) als mögliche Bewertungen untersucht. Da die Berechnungsweisen und Grenzwerte sich von den auf der Ökobaudat basierenden Berechnungen des vorliegenden Projektes unterscheiden, wurden diese Bewertungsmöglichkeiten ausgeschlossen.

Tabelle 2-1: Gewichtung von Ökobilanz-Ergebnissen innerhalb der Bewertungskriterien nach DGNB (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude 2015.2; ENV 1.1 und ENV 2.1) und BNB (Büro- und Verwaltungsgebäude; 1.1.1 bis 1.1.5 und 1.2.1) (eigene Darstellung)

	PEne	PEges	PEe/ PEges	GWP	EP	POCP	AP	ODP
DGNB	20,74%	13,83%	6,91%	23,41%	8,78%	8,78%	8,78%	8,78%
	41,48%							
BNB	15%	10%	5%	30%	10%	10%	10%	10%
	30%							

Die derzeit in Deutschland üblichen Zertifizierungssysteme, das des Bundes (Bewertungssystem nachhaltiges Bauen: BNB) und das der DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) berücksichtigen für die Bewertung von Ökobilanz-Ergebnissen jeweils sieben Indikatoren (siehe Tabelle 2-1), denen unterschiedliche Gewichtungen bzw. Punktwerte zugewiesen werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Primärenergiebedarf (PE) und Treibhauspotential. Als funktionale Einheit wird ein  $m^2_{NGF}$  des Gebäudes verwendet, der Betrachtungszeitraum beträgt in beiden Systemen 50 Jahre.

Für die Zertifizierung im BNB-System müssen zusätzlich Wasserverbrauch und Abiotisches Ressourcenabbaupotential (ADP) berechnet werden, allerdings gibt es hierfür noch keine Grenzwerte und damit keine Punktezuweisung.

Die Grenzwerte der beiden Zertifizierungssysteme wurden jeweils aus Gebäudedaten ermittelt. Eine Bezugnahme auf diese Grenzwerte ist in frühen Planungsphasen aus folgenden Gründen nicht praktikabel: Es liegt nur jeweils ein Wert für jeden Indikator vor, der sich nicht nach Bauweise oder Energiestandard unterscheidet, so dass eine darauf basierende Abschätzung in frühen Planungsphasen nicht möglich ist. Ferner muss die ökologische und ökonomische Bilanzierung in frühen Planungsphasen einfach und mit geringem Zeitaufwand erfolgen, um möglichst viele Varianten vergleichen zu können. Eine Betrachtung aller ausgewiesenen Umweltwirkungen ist so nicht praktikabel. Die Bewertung nach maximal ein bis zwei Hauptindikatoren muss für frühe Planungsphasen genügen.

Für eine Gewichtung innerhalb des Indikatorensets können die genannten Zertifizierungssysteme verwendet werden. Tabelle 2-1 zeigt die Wertung der Einzelindikatoren, errechnet aus den Punktwerten, die jeweils für die Ergebnisse der Indikatoren vergeben werden. Hierzu ist jedoch festzustellen, dass sich in keinem der beiden Systeme die genaue verwendete Gewichtung auf eine wissenschaftliche Grundlage stützt. Allein die herausragende Bedeutung des Treibhauspotenzials für das Bauwesen ist in Studien belegt (vgl. Ströbele, 2013).

### 2.2.1.3 Monetäre Bewertungsmethoden

Neben Top-Down- und Bottom-Up-Methoden besteht die Möglichkeit, Umweltwirkungen monetär zu bewerten. Die Bewertung durch einen Preis hat den Vorteil, dass sie die Umweltwirkung in allgemeinverständlicher Weise veranschaulicht. Gleichzeitig suggeriert dieses Vorgehen allerdings, dass dem Schutzgut Umwelt ein „Wert“ zugewiesen werden kann, so dass ein Umweltschaden gegebenenfalls durch die Zahlung des angesetzten Preises kompensiert werden kann. Diese Sichtweise ist dann besonders problematisch, wenn unwiederbringliche Schäden an der Umwelt (zum Beispiel der Verlust von Tier- oder Pflanzenarten) zu verzeichnen sind.

Eine zusätzliche Problematik der monetären Bewertung ist die Preisbildung. Am Beispiel der Bewertung des Treibhauseffektes soll dies im Folgenden verdeutlicht werden. Tabelle 2-2 zeigt die angesetzten Kosten für 1 Tonne CO<sub>2</sub> in unterschiedlichem Kontext. Auffällig ist zunächst die hohe Varianz der Kosten: Ecovalue 12 weist der Tonne CO<sub>2</sub> fast das 17-fache an Wert zu wie ExternE. Diese Spreizung stammt zum einen aus den unterschiedlichen Bewertungsmethoden (Vermeidungskosten, Schadenskosten, marktbasierter Kosten) und dem Zeitpunkt der Bewertung, aber auch aus den verschiedenen Zwecken der Bewertung. Beispielsweise unterliegen die Kosten von Emissionszertifikaten dem Markt. Zum Vergleich: Der Preis für die Emission von 1t CO<sub>2</sub> im EU-Emissionshandel lag im Juni 2017 bei ca. 5 €, im August 2018 bei ca. 16 €.

Tabelle 2-2: Multiplikatoren: Monetäre Bewertung 1 t CO<sub>2</sub> (Quellen: ecocost.com; atmosfair.de; myclimate.org; (jeweils abgerufen am 13.02.2017) Tekie&Lindblad, 2013, S. 40, umgerechnet auf €, UBA, 2012, Anhang B, S.5)

Bewertung	Kosten für 1t CO <sub>2</sub> -Äqu.	Jahr	Land	Methode
ExternE	19 €	2000	Europa	Krankheitskosten
Atmosfair	23 €	2017	Deutschland	Vermeidung durch Projekte, global
MyClimate	24 €	2017	Schweiz	Vermeidung durch Projekte, global
PUMA	63 €	2010	weltweit	Schadenskosten
MyClimate CH	75 €	2017	Schweiz	Vermeidung durch Projekte in der Schweiz
Eco-Cost'99	114 €	1999	Niederlande (und Europa)	Vermeidungskosten
ASEK	119 €	2010	Schweden	Vermeidungskosten, Schadenskosten
Eco-Costs	135 €	2017	Niederlande (und Europa)	Vermeidungskosten

Externe Kosten	70 € bis 280 €	2010	Deutschland (Österreich)	Schadenskosten 2°Ziel (mittlerer und oberer Schätzwert)
Ecovalue12	316 €	2010	Schweden (und Europa)	Marktpreise („Willingness to pay“)
UBA	40 - 390 €	2010, 2030, 2050	Deutschland	Wirkungspfadansatz

Dennoch ist eine monetäre Bewertung unter Umständen für das vorliegende Projekt interessant, da sich einerseits dadurch eine Gewichtung der einzelnen Indikatoren untereinander ergibt und andererseits die direkte Vergleichbarkeit mit den Lebenszykluskosten möglich ist.

### Externe Kosten und Eco-Costs

Für die monetäre Bewertung von in Ökobilanzen errechneten Umweltwirkungen sind derzeit zwei Methoden ausreichend weit entwickelt, um sie auf Gebäude-Ökobilanzen in Deutschland anzuwenden: Die externen Kosten (BMVBS, 2010) und die Eco-Costs. Die externen Kosten wurden im Rahmen eines Zukunft-Bau Projektes auf der Grundlage der UBA-Methodenkonvention (UBA, 2012) und eines österreichischen Projektes zu externen Kosten (Adensam, Bruck, 2002) festgelegt und für 6 Gebäude errechnet. Die Eco-Costs wurden Dr. Joost Vogtländer im Jahre 2001 erstmals publiziert (Vogtländer, 2001) und seither an der TU Delft (NL) weiterentwickelt.

Die Eco Costs sind Grenzkosten der Schadensvermeidung, d.h. die erforderlichen Investitionskosten, um die Emissionen auf eine umweltverträgliche Menge zu begrenzen. Die externen Kosten beruhen auf Berechnungen von Schadenskosten. Für das Treibhauspotenzial wird ein „best guess“ von 7 Cent pro kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent angegeben, aber gleichzeitig darauf hingewiesen, dass für Sensitivitätsanalysen der Maximalwert von 28 Cent pro kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent betrachtet werden sollte.

Tabelle 2-3 zeigt die Eco-Costs und die externen Kosten für fünf Indikatoren von Ökobilanzen. Diese Wirkungskategorien stimmen mit den Ökobaudat-Wirkungskategorien überein, so dass eine direkte Verwendung möglich ist. Die Berechnung der Eco-Costs beinhaltet zusätzlich einen Faktor für PENRM (nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung), der stellvertretend für den Ressourcenverbrauch verwendet wird.

Tabelle 2-3: Kosten-Multiplikatoren für die Umweltwirkungen (Eco-Costs (Vogtländer, 2018); Externe Kosten (BMVBS, 2010))

Wirkungsindikator	Menge und Einheit	Eco-Costs	Externe Kosten
Globales Erwärmungspotential (GWP)	1 kg CO <sub>2</sub> -Äqu.	0,135 €	0,07 € (0,28 max.)
Versauerungspotential von Boden und Wasser (AP)	1 kg SO <sub>2</sub> -Äqu.	8,24 €	5,20 €
Eutrophierungspotential (EP)	1 kg Phosphat-Äqu.	3,90 €	1,70 €
Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	1 kg R11-Äqu.	0,00 €	11,85 €

Bildungspotential für troposphärisches Ozon (POCP)	1 kg Ethen-Äqu.	9,70 €	0,265 €
Ressourcenverbrauch (stellvertretender Indikator: PENRM)	1 MJ	0,017 €	-

Im Kapitel 5.3 werden beide Methoden auf die Ergebnisse der Projekte angewendet und mit den Ergebnissen der Lebenszykluskosten verglichen.

## 2.2.2 Betrachtungsweisen Ökonomie

### 2.2.2.1 Lebenszykluskosten Prognosemodell

Das Forschungsprojekt „Lebenszykluskosten Prognosemodell“ beschäftigt sich mit der Abschätzung der Lebenszykluskosten in frühen Planungsphasen (BMVIT, 2011). Dazu definiert es für unterschiedliche Planungsstände wesentliche Parameter, die die Investitions- und Nutzungskosten beeinflussen. Zur Bewertung der zu erwartenden Kosten während der Nutzungsphase wurde eine umfassende Datenbankauswertung durchgeführt, anhand derer detaillierte Werte der Nutzungskosten für die Kostengruppen Betriebskosten, Instandhaltungs- sowie Abbruchs- und Umnutzungskosten ermittelt werden konnten.

Die Berechnungsmethodik erlaubt eine Abschätzung der Lebenszykluskosten anhand von zehn Parametern in der Initiierungsphase, 30 Parametern in der Entwurfsphase und von 100 Parametern in der Ausführungsplanungsphase. Eine detaillierte Beschreibung der Parameter fehlt im Bericht, so dass diese nicht mit den strategischen Parametern des vorliegenden Forschungsprojektes verglichen werden können.

### 2.2.2.2 Lebenszykluskosten (LCC)

Das Ergebnis einer Lebenszykluskosten-Untersuchung soll es unter anderem ermöglichen, über den Lebenszyklus wirtschaftlich günstige Projekte zu identifizieren (LeNa, 2016; GEFMA 220:2010-09 und ISO 15686-5:2008-06). Für diese Betrachtungsweise ist es notwendig, neben den entstehenden Kosten auch den Nutzen des Gebäudes zu bewerten. Diese Berechnungsmethode kann somit als Lebenszyklus-Erfolg oder, wenn zusätzlich zum Nutzen noch externe Kosten berücksichtigt werden, als Whole Life Costs (WLC) bezeichnet werden. Das Forschungsprojekt versucht diese Wechselwirkungen durch die Untersuchung der Bezugsgrößen  $m^2_{BGF}$  und  $m^2_{NGF}$  abzubilden.

## 2.2.3 Parallele Bewertung Ökonomie/Ökologie

Aus Kapitel 2.2.1 lässt sich keine eindeutige wissenschaftlich begründete Gewichtung der Ökobilanz-Indikatoren ableiten. Dennoch können einige Vereinfachungen ange-

wendet werden: Derzeit spielt das GWP und damit auch die Verwendung nicht erneuerbarer Primärenergie die größte Rolle in der Umweltbewertung von Gebäuden. Das Versauerungspotential (AP) spielt ebenso eine, allerdings im Vergleich zu GWP, geringe Rolle. Das GWP sowie die PENRT erhalten sowohl bei BNB als auch bei DGNB eine höhere Gewichtung. Gleichzeitig bilden das GWP, die PENRT und das AP die OI3-Indikatoren (s. 2.2.1.2). Auch bei der monetären Betrachtung durch Eco-Costs oder externe Kosten sind diese drei Indikatoren maßgebend (s. Kapitel 5.3). Ströbele (2013) kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass GWP und AP die maßgebenden Indikatoren für die Umweltwirkungen sind. Unter Berücksichtigung der analysierten Bewertungsmethoden wird daher der Fokus bei der LCA auf GWP, PENRT und AP gelegt. Inwiefern sich die Tendenzen dieser Indikatoren gleich verhalten, kann den Projektauswertungen in Kapitel 5.1 entnommen werden.

Den Umweltwirkungen werden durch die LCC-Bilanzierungsmethode die Lebenszykluskosten (in €) gegenübergestellt. Ein direkter Vergleich der Umweltwirkungen und Lebenszykluskosten erfolgt zusätzlich über die Berechnung der Eco-Costs und externen Kosten. (Kapitel 5.3).

### 3 Definition der projektspezifischen Rahmenbedingungen

Die Zusammenstellung und Beurteilung der stofflichen und energetischen Input-, Betriebs- und Outputflüsse sowie der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges ergibt die Ökobilanzierung des Produktsystems (DIN EN ISO 14044:2006-10, Abschnitt 3.2). Um die Optimierungsmöglichkeiten dieser Zusammenstellung für frühe Leistungsphasen identifizieren zu können, gilt es zunächst, die Systemgrenzen und Randbedingungen der LCA und LCC festzulegen. Abbildung 3-1 stellt die relevanten Lebenszyklusphasen eines Gebäudes dar, die grundsätzlich berücksichtigt werden sollen. Welche hier in die Bewertung mit einfließen, wird nachfolgend erörtert.

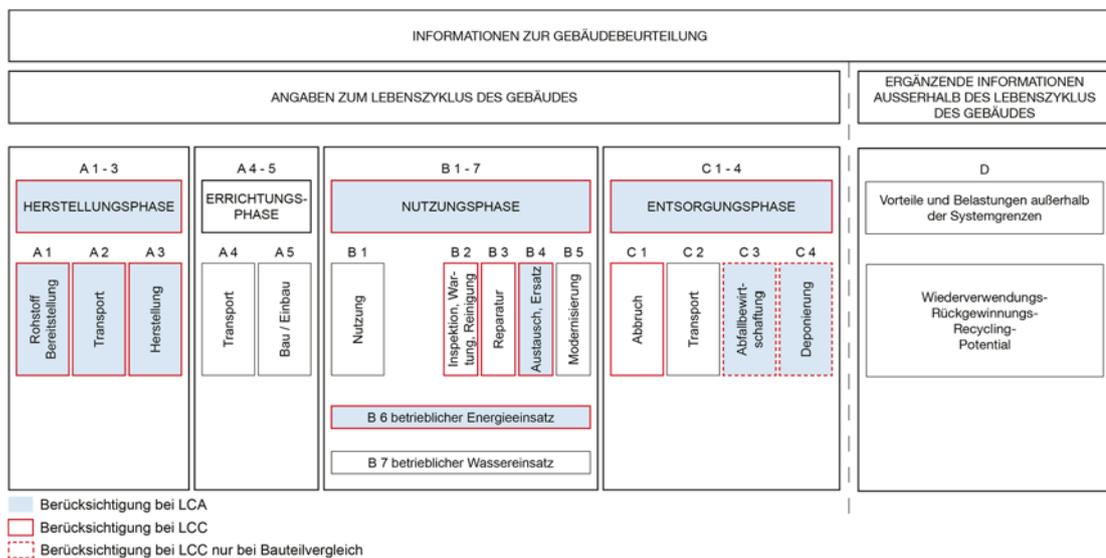


Abbildung 3-1: Berücksichtigte Lebenszyklusphasen des Gesamtgebäudes nach DIN EN 15978 für LCA und LCC (eigene Darstellung nach DIN EN 15978, 2012, Bild 6)

#### 3.1 Notwendige Projektinformationen

Um vergleichbare Ergebnisse der Forschungsarbeit erzielen zu können, werden Bürobauprojekte der Firma ATP sustain GmbH ausgewählt, die den gleichen Projektstand und eine ähnliche Ausführung aufweisen:

- Eine Bearbeitungstiefe von mind. Leistungsphase 6
- Energiestandard ist mind. EnEV 2009
- Stahlbetonskelett bzw. -schottenbauweise, wobei die Fassadenarten variieren dürfen

Aus vorangegangenen Studien ist bekannt, dass unterirdische Bauteile und insbesondere Tiefgaragen das Gesamtergebnis wesentlich beeinflussen (OBB, 2017). Dieser Einfluss kann im vorliegenden Projekt nicht genau analysiert werden, da nicht alle Projekte eine Tiefgarage besitzen. Daher werden etwaige vorhandene Tiefgaragen nicht berücksichtigt, um eine mögliche Verzerrung der Ergebnisse durch die Tiefgarage zu vermeiden. Eine Projektübersicht kann Kapitel 4 entnommen werden. Ferner

werden für eine Vergleichbarkeit der Projekte Anforderungen an geometrische, bauphysikalische, materialspezifische und kostenbezogene Informationen gestellt.

### 3.1.1 Informationen zur Geometrie und zum Energiebedarf

Für die Berechnung der Ökobilanz und der Lebenszykluskosten müssen umfassende Berechnungen zu den Gebäudeflächen (NGF), Gebäudevolumen und zum Projektstandort vorliegen.

In die Berechnung der Ökobilanz und der Lebenszykluskosten fließen die Ergebnisse der EnEV-Berechnung (2009 bzw. 2014) mit ein. Die Berechnungsergebnisse beeinflussen die Ergebnisse in der Nutzungsphase (Phase B6). Eingangsgrößen für die Berechnung der EnEV sind:

- Bauteilaufbauten mit Angaben zur Schichtdicke, und der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmespeicherfähigkeit der enthaltenen Materialien
- Flächen aller Bauteile nach Konstruktion und Zone
- Bauteiltyp
- Bauteilorientierung
- Bauteilneigung
- Angrenzende Temperaturzonen
- Raumgrößen
- Lichte Raumhöhen
- Gebäudetechnische Anlagen

Für die Berechnung der Ökobilanz und der Lebenszykluskosten sind anschließend folgende Ergebnisse nötig:

- Erzeugernutzenergiebedarf (aus dem Nachweis EEWärmeG)
- Endenergiebedarf Wärme – Umrechnung von Brenn- auf Heizwert
- Endenergiebedarf Strom
- Aufteilung der Energieträger

### 3.1.2 Anforderungen für die Durchführung der Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenanalyse

Um die LCA und LCC der Projektbeispiele berechnen zu können, sind detaillierte Materialangaben erforderlich:

- Eindeutige Materialbezeichnung statt Funktionsbeschreibung (z.B. PE-Folie statt „Dampfbremse“)
- Bauphysikalische Eigenschaften (z.B. Rohdichte oder Wärmeleitfähigkeiten)
- Möglichkeit zur eindeutigen Zuordnung zu einer Kostengruppe nach DIN 276-1:2008-12

Die Aufschlüsselung in einzelne Bauteilschichten bzw. Technikkomponenten muss gewährleistet werden, damit vergleichende Berechnung gegliedert nach den vier Lebenszyklusphasen – Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase (vgl. Abbildung 3-1) – auf Basis einer einheitlichen Datengrundlage erfolgen kann.

Bestenfalls können so materialspezifische Datensätze und durchschnittliche Kostenkennwerte verwendet werden, die eine realitätsnahe Abbildung der ökologischen bzw. ökonomischen Qualität zulassen.

Bei fehlenden Detailangaben wird eine praxisgerechte Annahme getroffen. Die Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenberechnung erfolgt entlang der Regeln des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) für den Neubau von Büro- und Verwaltungsgebäuden (BMUB, 2015a; BMUB, 2015b). Die Wahl der projektspezifischen Systemgrenzen können Kapitel 3.2 entnommen werden.

## 3.2 Systemgrenzen

Um Maßgaben für eine parallele Bewertung der ökologisch und ökonomisch relevanten Planungsparameter zu identifizieren, müssen die untersuchten Lebenszyklusphasen der LCA und LCC soweit wie möglich abgeglichen werden. Räumliche und zeitliche Systemgrenzen werden nachfolgend beschrieben ebenso wie vorhandene Datenlücken.

### 3.2.1 Systemgrenzen: räumlich

Die Stoff- und Energieströme sowie Kosten der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphasen (siehe Abbildung 3-1) der Gebäude werden gemäß der KG der DIN 276-1:2008-12 gegliedert. Die Erhebung der ökologischen und ökonomischen Qualität erfolgt in enger Anlehnung an die Regeln des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) für den Neubau von Büro- und Verwaltungsgebäuden.

Bei der Betrachtung der Neubauten wird die räumliche Systemgrenze um die KG 300 (Bauwerk – Baukonstruktion) und KG 400 (Bauwerk – Technische Anlagen) nach DIN 276-1:2008-12 gelegt, wie es auch die BNB-Bilanzierungsregeln vorsehen (BMUB, 2015b). Die ausgewählten Teile der KG 500 sowie die KG 100, 200, 600 und 700 bleiben jedoch unberücksichtigt. Die räumliche Systemgrenze bildet in dieser Studie die Umfassungsfläche des Gebäudes, da der Forschungsschwerpunkt in der Optimierung der Planungsentscheidungen liegt, die das Bauwerk direkt betreffen. KG 100 behandelt hingegen den Erwerb des Grundstückes, KG 200 die Erschließung und das Herrichten des Grundstückes. Auch KG 500, 600 und 700 beziehen sich nicht auf das Gebäude direkt, sondern auf Außenanlagen, Ausstattung sowie Baunebenkosten. Diese Kostengruppen (KG) sind projektspezifisch und deren Stoff- und Energieströme können je nach Bauprojekt und Bauort stark voneinander abweichen.

Pohl (2014, S.85) identifiziert für die Ökobilanzierung die KG 420 bis 440 und 460 als Ergebnistreiber der TGA bei seinen drei beschriebenen Vergleichsprojekten. Bei den in den Projekten vorhandenen Förderanlagen (KG 460) handelt es sich um Aufzüge. Da diese aber auf Grund der Gewährleistung der Barrierefreiheit unabdingbar und somit nahezu unveränderbar sind, stellen sie kein Optimierungspotential in frühen Planungsphasen dar. Deshalb werden sie in dieser Studie nicht bilanziert.

Tabelle 3-1 stellt die Kostengruppen – gegliedert bis zur zweiten Ebene – vor, die im Rahmen des Forschungsprojektes bilanziert und einzeln aufgenommen werden. Innerhalb der KG 400 werden nur die Energieerzeuger der KG 410 bis 430 detailliert erhoben. Zusätzlich werden auf die KG 400 pauschal 20 % der ökologischen Werte

der KG 300 und Energieerzeuger aufgeschlagen. Dabei folgt man den Vorgaben des DGNB (DGNB, 2018), um so die nicht detailliert erhobenen TGA-Komponenten zu berücksichtigen.

Tabelle 3-1: Berücksichtigte Kostengruppen nach DIN 276-1:2008-12 (eigene Darstellung)

Bauwerk - Baukonstruktion (KG 300)		Bauwerk - Technische Anlagen (KG 400)	
Kostengruppe	Beschreibung	Kostengruppe	Beschreibung
320	Gründung	410	Wasser-, Abwasser-, Gasanlagen
330	Außenwände	420	Wärmeversorgungsanlagen
340	Innenwände	430	Lufttechnische Anlagen
350	Decken		
360	Dächer		

Als Bezugsgröße definiert das BNB die durchschnittliche jährliche Umweltwirkung im Lebenszyklus je  $m^2_{NGF}$  nach DIN 277-1:2005-02 (BMUB, 2015b). König (2008, S.8-77) empfiehlt ebenfalls die NGF als Bezugsfläche. Bei der LCC ist zwar der Bezug auf die BGF gängiger (BMUB, 2015a), jedoch wird hier zum besseren Vergleich der Bilanzierungen darauf verzichtet.

Im Unterschied zur LCA wird die LCC eigentlich auf  $m^2$  BGF bezogen (BMUB, 2015a). Für eine bessere Vergleichbarkeit wird aber darauf verzichtet, die Bezugsgröße bleibt die NGF. Diese gewährleistet nicht nur den transparenten Vergleich der spezifischen Umweltwirkungen und Stoffströme der einzelnen Projekte und seiner Komponenten. Auch die Anteile von Einzelkomponenten (z.B.  $m^2$  Bauteil) können auf die NGF bezogen werden. Sie ist eine gängige Größe bei Planern und Bauherren zur Bedarfsermittlung in frühen Planungsphasen (Nutzungskonzepte, Energiebedarfsberechnung).

### 3.2.2 Systemgrenzen: Lebenszyklusphasen (zeitlich)

Die Gebäudekomponenten dieser Kostengruppen werden über die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes ausgewertet. Abbildung 3-2 zeigt, welche Lebenszyklusphasen je Kostengruppe bei der LCA bzw. LCC betrachtet werden. Der Abgleich der Betrachtungs-Systemgrenzen von LCA und LCC über die Lebenszyklusphasen hinweg zeigt, dass diese teilweise unterschiedlich gelagert sind. Denn manche Phasen werden in der Ermittlung der Lebenszykluskosten einbezogen, in der Ökobilanz finden diese jedoch keine Berücksichtigung und umgekehrt. Als Datengrundlage zur Ermittlung der Umweltwirkungen bzw. Stoffströme wird primär die Ökobaudat (Version 2016-I) verwendet (vgl. Kapitel 3.3). In der aktuellen Version werden zwar zu mehr als 1000 Bauprodukten Datensätze bereitgestellt, trotzdem liegen für die große Mehrheit der Materialien nur Datensätze für die Herstellungsphasen A1 bis A3 und die Entsorgungsphasen C3 bzw. C4 vor (BMI, o.J.). Aus diesem Grund beschränkt sich die ökologische Untersuchung der Gebäudekomponenten auf die Lebenszyklusphasen A1-A3, B4 und C3 bzw. C4.

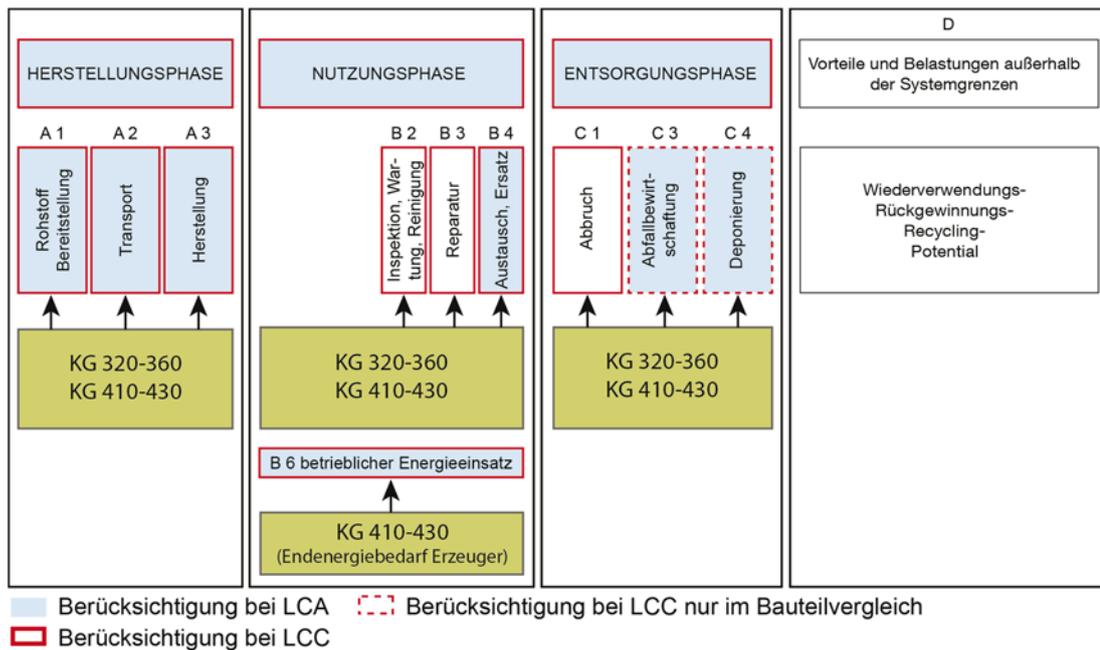


Abbildung 3-2: Berücksichtigte Lebenszyklusphasen je Kostengruppe bei der LCA bzw. LCC (eigene Darstellung nach DIN EN 15978:2012-10, Bild 6)

Die Phase B4 (Austausch und Ersatz) errechnet sich dabei aus den Entsorgungsphasen (C3 und C4) der ausgebauten Komponenten und den Herstellungsphasen (A1-A3) der neu eingebauten Komponenten:

$$U_{B4} = n \cdot (U_{A1} + U_{A2} + U_{A3} + U_{C3} + U_{C4}) \quad (\text{Gl. 3-1})$$

Mit:

- n: Anzahl der Austauschzyklen der Baukomponente während der Lebensdauer des Gebäudes
- U: Umweltwirkung bzw. Stoffstrom der jeweiligen Lebenszyklusphase, wobei davon ausgegangen wird, dass wieder das identische Material mit den gleichen Produkteigenschaften eingebaut wird

Der betriebliche Energieeinsatz (Phase B6), seine Kosten und seine Umweltwirkungen werden nach dem Endenergiebedarf für Wärme, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und Hilfsenergie des Energiebedarfsausweises des jeweiligen Gebäudes errechnet und dabei den erzeugenden Komponenten der TGA (KG 410 bis 430) zugewiesen.

Das BNB berücksichtigt das Modul D „Recyclingpotential“ nicht. Deshalb wird es auch in dieser Studie zunächst nicht bei den Projektergebnissen mitgeführt. Trotzdem enthält es relevante Hinweise auf Wiederverwendungs- und Recyclingpotentiale, die als Gutschriften ausgewiesen werden können und beachtet werden sollten. Einige Baumaterialien, die ein hohes Recyclingpotenzial besitzen, werden nachteilig dargestellt, wenn die Phase D unberücksichtigt bleibt. Dazu gehört zum Beispiel das Holz, für das sich erst mit Berücksichtigung der Phase D der Vorteil gegenüber mineralischen Alternativen zeigt, da es als Brennstoff genutzt werden kann und so Treibhausgaspotenzial einspart. Deshalb wird die Phase D beim Fallbeispiel in Kapitel 7.3 dargestellt. Kostenansätze für eine Phase D sind nicht allgemeingültig möglich.

Eine Modernisierung (B5) des Gebäudes wird weder bei der LCA noch bei der LCC berechnet. Grund ist der Mangel an ökologischen und ökonomischen Datensätzen. Die Errichtungsphasen (A4 und A5) werden derzeit weder bei der LCA noch LCC mit einbezogen, obwohl diese Phasen sowohl für die Lebenszykluskosten als auch für die Umweltwirkungen relevant sein können. Interessant wird der Einfluss allerdings erst bei längeren Transportstrecken.

Die Phasen C1 und C2 befassen sich analog zu A4 und A5 mit den Stoff- und Energieströmen des Rückbaus und des Abtransportes. Auch diese Phasen können bei der LCA mangels Daten noch nicht lückenlos berücksichtigt werden. Hier besteht über dieses Projekt hinaus weiterer Forschungsbedarf. Ferner bezieht der BNB die Entsorgungsphase grundsätzlich nicht in die Betrachtung der Lebenszykluskosten mit ein. Im Projekt wurde trotzdem versucht, Entsorgungskosten zu ermitteln. So wurden für die Beispielprojekte in Abhängigkeit der Brutto-rauminhalte Rückbaukosten (Phase C1) berechnet (vgl. Kapitel 5.2) und im Bauteilvergleich wurde eine detaillierte Untersuchung möglicher Entsorgungskosten (Phase C3 bzw. C4) durchgeführt (vgl. Kapitel 6.5.2), um trotzdem Vergleiche zwischen LCA und LCC ziehen zu können.

Eine parallele Betrachtung von LCA und LCC ist für die Herstellungsphase (A1-A3), den Austausch und Ersatz in der Nutzungsphase (B4) und den betrieblichen Energieeinsatz (B6) möglich. Darüber hinaus gibt das BNB vor, wie man in Abhängigkeit der Herstellungskosten Wartungs-, Reinigungs- und Instandsetzungskosten berechnen kann (Phasen B2 und B3) (BMUB, 2015a). Hier fehlen flächendeckende Datensätze in der Ökobaudat zur Durchführung der LCA.

### 3.2.3 Systemgrenzen: Betrachtungszeiträume

Der gewählte Betrachtungszeitraum nimmt einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtergebnisse der LCA und LCC. Besonders bei Bürobauten kann z.B. ein Mieter- oder Nutzerwechsel den Austausch von Bauteilen vor Erreichen ihrer maximalen Lebensdauer bedeuten (Innenausbau, Ausstattung, usw.).

Zunächst wird standardmäßig bei der Berechnung der Beispielprojekte eine Gebäudelebensdauer von 50 Jahren angesetzt. Die Nutzungsdauern der einzelnen Kostengruppen werden zunächst gemäß des BNB definiert und auf die LCC-Bilanzierung übertragen (BMUB, 2017).

Darüber hinaus wird anhand eines Beispielprojektes eine Differenzbetrachtung geführt, indem Gebäudelebensdauern von 30 und 80 Jahren ergänzt werden (vgl. Kapitel 6.1). Ziel ist es Parameter zu identifizieren, deren Einflüsse maßgebend vom Betrachtungszeitraum abhängig sind.

## 3.3 Randbedingungen und Bewertungstools

Vorgabe des Projektes ist, die Ökobilanzierung und Lebenszykluskosten mit dem kostenlosen Bewertungstool eLCA (Version v0.9.4 Beta) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR; [www.bauteileditor.de](http://www.bauteileditor.de)) zu berechnen. Das eLCA-Tool wird stetig vom BBSR weiterentwickelt, um im Rahmen des Bewertungssystems BNB die ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung durchzuführen. Grundsätzlich ist es möglich, Bilanzierungen des Gebäudes in unterschiedlichen Varianten zu betrachten.

Das Tool lässt innerhalb der Projektdatei einen Vergleich zwischen verschiedenen Planungsphasen zu: Prognose, Vorplanung, Entwurfsplanung und Ausführungsplanung. Ein weiterer Vorteil des Tools ist die automatische Zugriffsmöglichkeit auf die Datenbasis der Ökobaudat (derzeit 2016-I). Die Ökobaudat ist die verbindliche Datenbasis für die Bewertung nach den BNB-Kriterien. Sie setzt sich aus generischen Datensätzen und spezifischen Datensätzen und Umweltproduktdeklarationen zusammen (EPD), wobei diese mit der DIN EN 15804:2014-07 konform sind (BMI, o.J.).

In erster Linie wurde die Entwicklung des Tools durch die Erhebung der LCA geprägt, die Lebenszykluskostenbetrachtung wurde erst kürzlich integriert. Während man bei der LCA automatisiert Daten aus der aktuellen Ökobaudat auswählen kann, fehlt bei der LCC noch eine Verknüpfung zu einer externen Baukostendatenbank, die aktuell gehalten wird. Hier müssen die bauteil- bzw. schichtspezifischen Kostenkennwerte händisch eingetragen werden. Da es für das Forschungsprojekt wichtig ist, auch eine Aussage über die schnelle und leichte Durchführbarkeit von Lebenszyklusbetrachtungen in frühen Planungsphasen treffen zu können, wird für die LCC eine Alternative geprüft. ATP sustain als auch der Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen haben Erfahrungen mit der Anwendung der kommerziellen Software Legep (Legep, o.J.a), die letztlich für die Erstellung der LCC verwendet wurde. Legep greift zur Berechnung der Lebenszykluskosten auf die Sirados Baudatenbank (Nettokosten) zurück (Stand: 2015; Weka Media, o.J.). Dabei wird auf die Kostengruppen 300 und 400 wie in Kapitel 3.2.1, Tabelle 3-1 beschrieben eingegangen. Da die Kosten von Bauprodukten und das Lohngefüge in vielen Regionen stark unterschiedlich sind, werden diese Kosten mit einem Regionalfaktor beaufschlagt. Um die Kostentreiber zu identifizieren und vergleichbare Kostenkennwerte zu erhalten, wird die Regionalität der Projekte für diese Studie außer Acht gelassen. Indem sie nicht mit einem Regionalfaktor beaufschlagt werden, werden sie standortneutral berechnet.

Zusätzlich zu den Investitionskosten werden im BNB-System die Nutzungskosten ermittelt. Diese gliedern sich in die Energiekosten, Reinigungskosten, Wartung und Inspektionen sowie Instandsetzungskosten (regelmäßige und unregelmäßige). Zusätzlich zu den Nutzungskosten werden auch die Rückbaukosten für die Beispielprojekte ermittelt. Die Kennwerte für die Rückbau- und Entsorgungskosten müssen in nachfolgenden Forschungsprojekten weiter geschärft werden, da diese bisher nur grob erfasst werden. Die Wartung und Inspektionen sowie die regelmäßigen Instandhaltungskosten werden anhand von Prozentwerten ermittelt, die dem BNB-System entnommen werden können. Ebenso können Kennwerte für die Reinigungskosten dem BNB-System entnommen werden (BMUB, 2015a). Die unregelmäßigen Instandsetzungskosten werden anhand der Materiallebensdauer ermittelt. Die Lebensdauer der Baustoffe wird in einer Tabelle, die vom BNB veröffentlicht wurde, zusammengefasst (BMUB, 2017). Diese Lebensdauern sind im eLCA-Tool hinterlegt und werden aus dem eLCA-Tool für weitere Analysen übernommen. Bei materialabhängigen Abweichungen (z.B. unterschiedliche Lebensdauer von Dämmstoffen) folgt man nicht mehr den Vorgaben des BNB sondern der differenzierteren Vorgabe des eLCA-Tools.

Die anfallenden Kosten werden dann nach der Barwertmethode entsprechend ihrem Entstehungszeitpunkt bewertet und können zum Schluss in €/m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> bzw. für eine bessere Vergleichbarkeit mit der Ökobilanz in €/m<sup>2</sup><sub>NGFa</sub> ausgewertet werden.

Als Grundlage für die ökologische und ökonomische Analyse der Betriebsphase (B6) des Gebäudes dienen die projektspezifischen EnEV-Berechnungen nach

DIN V 18599, Teile 1 bis 11. Die in den Berechnungen angegebenen Endenergiebedarfe werden je Energieträger unterteilt. Da bei zwei Projekten die vorhandenen EnEV-Berechnungsergebnisse nicht nachvollzogen werden konnten, wurden diese mit Hilfe der Software „Solar-Computer“ und „ZUB Helena Ultra“ erneut berechnet. Die Energiekosten in der Betriebsphase B6 werden entsprechend der Berechnungsrandbedingungen des BNB Kriteriums 2.1.1 Anlage 3 Energie- und Medienpreise berechnet.

Tabelle 3-2: Energie- und Medienpreise (BMUB, 2015a)

Medium	Einheit	Preis ohne MwSt. [€/Einheit]
Strom	kWh	0,200
Heizöl	kWh	0,070
Erdgas	kWh	0,060
Holzpellets	kWh	0,057
Fernwärme	kWh	0,077
Trinkwasser	m <sup>3</sup>	2,01
Abwasser	m <sup>3</sup>	2,14

Des Weiteren wurde die Berechnung der Lebenszykluskosten entsprechend den Regeln des Kriterien Steckbriefs BNB 2.1.1 Anlage 4 vorgenommen.

- Jährliche Preissteigerung für Bau- und Dienstleistungen 2 %
- Jährliche Preissteigerung für Energie 5 %
- Diskontierungszinssatz 1,5 % (BMUB, 2015a)

Damit die Ökobilanz und die Lebenszykluskosten möglichst parallel betrachtet werden können, wurde in diesem Forschungsprojekt ein erster Ansatz gewählt, um die Rückbaukosten für die Beispielprojekte zu ermitteln und im weiteren Projektverlauf im entwickelten Bewertungsverfahren auch die Entsorgungskosten für alternative Konstruktionen betrachten zu können.

Tabelle 3-3: Bewertungsansatz der Rückbaukosten (eigene Darstellung)

Kostengruppe		Berechnungsmethode Abbruch
322	Flachgründung	massenspezifische Berechnung (kurz: m.B.)
324	Tiefgründung	m.B.
325	Bodenbeläge	m.B./ manueller Rückbau
326	Bauwerksabdichtung	m.B.
331	Tragende Außenwände	m.B.
332	Nichttragende Außenwände	manueller Rückbau
333	Außenstützen	m.B.
334	Außentüren und -fenster	manueller Rückbau
335	Außenwandbekleidungen außen	m.B.
336	Außenwandbekleidungen innen	m.B.
337	Elementierte Außenwände	manueller Rückbau
338	Sonnenschutz	m.B.
339	Außenwände Sonstiges	m.B.

341	Tragende Innenwände	m.B.
342	Nichttragende Innenwände	manueller Rückbau
343	Innenstützen	m.B.
344	Innentüren und -fenster	manueller Rückbau
345	Innenwandbekleidung	m.B./ manueller Rückbau
346	Elementierte Innenwände	manueller Rückbau
351	Deckenkonstruktionen	m.B.
352	Deckenbeläge	m.B./ manueller Rückbau
353	Deckenbekleidungen	manueller Rückbau
361	Dachkonstruktionen.	m.B.
362	Dachfenster, Dachöffnungen	manueller Rückbau
363	Dachbeläge	m.B./ manueller Rückbau
364	Dachbekleidungen	manueller Rückbau

Bei den Kostengruppen mit der Kennzeichnung einer massenspezifischen Kostenbewertung wurden die Abbruchkosten für die Bauweise „Betonwand und Decke“ und der Abbruchmethode „Selektiver Rückbau für alle Bauteile mit Kennzeichen >>Ausbau und Austausch<< und >>Ausbau<<“ in Legep ermittelt und dann massenspezifisch aufgeteilt. Diese Methode wenden auch Geissler et. al. (BMVIT, 2011) im Forschungsprojekt „Lebenszykluskosten Prognosemodell“ an, um eine Prognose der Rückbau- und Abbruchkosten vornehmen zu können.

### 3.4 Auswertung und Darstellungsweisen

Ziel der Wahl der Auswertung und Darstellungsweise ist die Identifizierung der strategischen Stellschrauben in frühen Planungsphasen.

Für die Bewertung der ersten Projektergebnisse stellt sich der Bezug auf  $m^2_{NGF}$  und Jahr als geeignete funktionale Einheit heraus (vgl. Kapitel 3.2.1). Ferner wurde der Bezug auf die Massenanteile der Bauteile untersucht (kg). Vorteil dieses Bezugs wäre die materialspezifische Vergleichbarkeit der Umweltwirkungen und Ressourceninanspruchnahme. Da aber dieser Bezug besonders bei den Lebenszykluskosten keine geradlinige Interpretation der Ergebnisse zulässt, wird diese Betrachtung verworfen.

Für die Ergebnisse der LCA werden GWP, PENRT und AP herangezogen, wie im Kapitel 2.2.3 erläutert. Zusätzlich werden Eco-Costs und zum Vergleich z.T. externe Kosten berechnet (s. Kapitel 2.2.1.3).

Die Kostengruppen KG 300 und KG 400 werden separat ausgewiesen. Die detaillierte Berechnung der KG 400 wird aber im weiteren Projektverlauf lediglich im Rahmen eines Projektes (Projekt A) durchgeführt (siehe Kapitel 6.3). Dies hat mehrere Gründe:

- Auf Grund fehlender ökologischer und ökonomischer Datenquellen zu verschiedenen Komponenten kann die TGA aktuell nicht ganzheitlich bilanziert werden. Dies betrifft insbesondere ganze Systemkomponenten oder Steuerungsanlagen.
- Die Zusammensetzung der gesamten TGA ist sehr komplex und umfangreich. Zwar stehen meist detaillierte Projektinformationen zur Verfügung, dennoch kann die TGA nicht in jedem Projekt gänzlich erfasst werden.

- Die derzeitig überschlägig berechneten Kennwerte der KG 400 sind im Verhältnis zu den Werten der KG 300 relativ niedrig. Mit Hilfe einer detaillierten Analyse eines Projektes können zumindest mögliche Stellschrauben identifiziert werden.

Die Ergebnisse werden zunächst je erster und zweiter Kostengruppenebene tabellarisch nach DIN 276-1:2008-12 dargestellt (vgl. Kapitel 5.1.1 und 5.2.1), um für andere Neubauprojekte Vergleichswerte für frühe Planungsphasen zur Verfügung zu stellen. Denn zumeist werden in frühen Planungsphasen grobe Kostenschätzungen auf erster bzw. zweiter Kostengruppenebene vorgenommen und über die NGF hochgerechnet.

Die projektübergreifende Ergebnisanalyse (vgl. Kapitel 5.1.2 bis Kapitel 5.1.4 bzw. Kapitel 5.2.2 bis Kapitel 5.2.4) erfolgt allerdings primär nach funktionaler Kategorie. Dabei werden die Werte je dritter Kostengruppenebene entsprechend Abbildung 3-3 zu funktionalen Kategorien zusammengefasst. Mit Hilfe von kumulierten Balkendiagrammen und prozentual gestapelten Säulendiagrammen kann hier der Einfluss der einzelnen funktionalen Kategorien gut abgebildet werden.

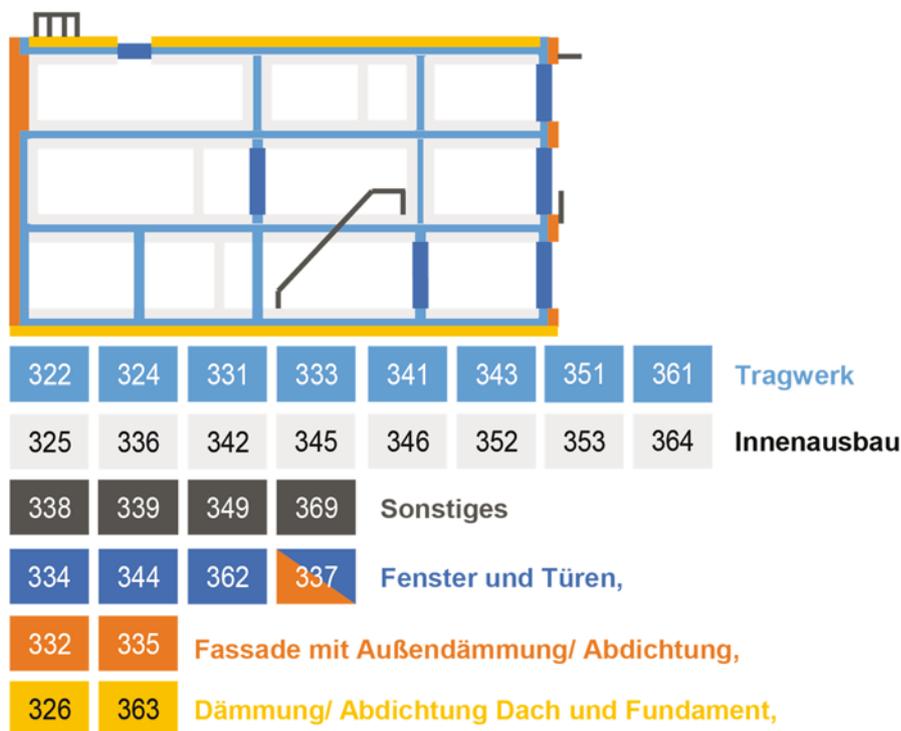


Abbildung 3-3: Zuordnung der in den Projekten identifizierten Kostengruppen nach DIN 276-1:2008-12 zu den funktionalen Kategorien (eigene Darstellung)

## 4 Beschreibung der Beispielprojekte

Tabelle 4-1: Übersicht über die zur Analyse der LCC und LCA herangezogenen Büro- und Verwaltungsbauten von ATP sustain GmbH aus den Jahren 2009 - 2017

Projekt	Geschossanzahl	Fläche m <sup>2</sup> BGF	Gebäudestandard	Planungszeitraum	Konstruktion
Projekt A	II	2.663 m <sup>2</sup>	EnEV 2014	2014-2016	Massivbau + WDVS und hinterlüftete Fassade
Projekt B	II	3.407 m <sup>2</sup>	EnEV 2014	2014-2017	Massivbau + hinterlüftete Fassade, in Teilbereichen Blechelemente
Projekt C	V	17.508 m <sup>2</sup>	EnEV 2009	2009-2013	Massivbau + Betonsandwichfassade, hinterlüftete Fassade
Projekt D	TG + VI	14.300 m <sup>2</sup>	EnEV 2014	2012-2014	Massivbau + hinterlüftete Fassade
Projekt E	TG + IV	5.191 m <sup>2</sup>	EnEV 2014	2014-2016	Massivbau + hinterlüftete Fassade

Die ausgewählten Beispielprojekte weisen die in Kapitel 3.1 geforderten Anforderungen an den Detaillierungsgrad auf: Die Tragkonstruktion ist in allen fünf Projekten massiv (Stahlbeton und Mauerwerk) ausgeführt und entspricht damit in Materialität und Konstruktion der gegenwärtig sehr verbreiteten Bauweise im Büro- und Verwaltungsbau. Die opaken Außenwände sind zumeist als vorgehängte hinterlüftete Fassaden vor einer Massivwand, die transparenten Teile als Elementfenster und Pfosten-Riegel-Fassaden mit Metallprofilen ausgeführt. Auch hierin ähneln sich die Projekte, und spiegeln einen zeitgemäßen Standard wieder. In der Gebäudegröße variieren die Gebäude zwischen zwei bis sechs Geschossen mit und ohne Tiefgarage sowie einer Brutto-Grundfläche zwischen 2.663 m<sup>2</sup> bis 17.508 m<sup>2</sup> (siehe Tabelle 4-1). Detailliertere Informationen zu den einzelnen Projekten sind den folgenden Abschnitten bzw. den Steckbriefen im Anhang A1 zu entnehmen.

Aus den Erfahrungen der ATP sustain GmbH repräsentieren diese Projekte sowohl in ihrer Funktion als auch in der Bauweise einen Großteil der derzeitigen Projekte im Büro- und Verwaltungsbau. Die Gebäude werden in der Hauptfunktion als Büroräume genutzt, mit geringen Anteilen an Nebenfunktionen. Alle Projekte besitzen eine Kantine, außer Projekt C, welches einen Sozialbereich mit Umkleiden und Duschen besitzt.

Spezifische Besonderheiten der Projekte, die Einfluss auf die Ergebnisse der LCA und / oder der LCC haben, werden im Zuge der Ergebnisse beschrieben.

## 4.1 Getroffene Annahmen zugunsten der Vergleichbarkeit

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse und einer einheitlichen Betrachtungsweise der ausgewerteten Projekte werden zusätzliche Annahmen und Festlegungen getroffen:

- Die vorhandenen Tiefgaragen (Projekt D und E) werden inklusive ihrer Massen- bzw. Flächenanteile zunächst nicht bei der Untersuchung berücksichtigt. Maßgebend ist hier das beheizte Gebäudevolumen. Näherungsweise wird die Decke über UG im Bereich der Tiefgarage als Bodenplatte angenommen.
- Pfosten- und Riegel-Konstruktionen (KG 337), werden entsprechend ihrer Flächenfüllung der KG 332 (opake Bereiche) und zum anderen Teil der KG 334 (transparente Bereiche) zugeordnet.

## 4.2 Vorstellung der Beispielprojekte

Im Folgenden werden die Projekte im Einzelnen beschrieben. Nähere Informationen finden sich in den Steckbriefen im Anhang (Anhang A1).

### 4.2.1 Projekt A

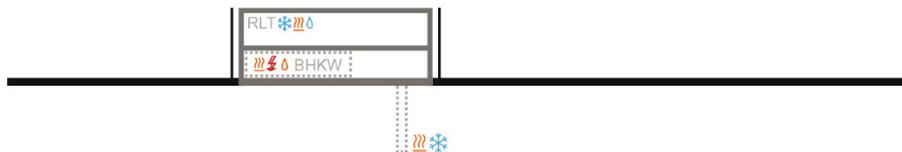


Abbildung 4-1: Gebäudeschema Projekt A (eigene Darstellung)

Projekt A ist ein zweigeschossiges Bürogebäude mit einer NGF von 2.510 m<sup>2</sup> und einer kleinen Technikzentrale auf dem Dach. Das Gebäude ist in Stahlbetonbauweise erstellt. Neben den Büroräumen befinden sich im Gebäude auch Besprechungsräume sowie eine Kantine mit 132 Plätzen mit zugehöriger Küche.

Die Außenwände sind mineralisch gedämmt und mit hinterlüfteten Blechkassetten verkleidet. Die Öffnungen sind als umlaufende Fensterbänder angeordnet.

Die Heizenergieversorgung erfolgt über Wärmepumpen und eine KWK-Anlage zur Spitzenlastabdeckung. Das Gebäude verfügt außerdem über eine Lüftungsanlage, die im Sommer auch Kühlfunktionen übernimmt.

### 4.2.2 Projekt B



Abbildung 4-2: Gebäudeschema Projekt B (eigene Darstellung)

Projekt B ist ein zweigeschossiges Bürogebäude mit einer NGF von 3.040 m<sup>2</sup>, an dessen Nordseite eine beheizte Lagerhalle über eine Länge anschließt. In diesem Bürotrakt befinden sich neben den Büros und einer Mitarbeiterkantine auch Demonstrationsräume und Werkstätten für die hergestellten Produkte sowie ein Ausstellungsraum. Da diese Nutzungen unmittelbar den Büros zugeordnet sind, wurde das komplette Gebäude als Büro betrachtet.

Die Ost- und Westfassade ist als vorgehängte hinterlüftete Fassaden mit Mineralwoll-dämmung und einer Blechverkleidung ausgeführt. Diese Fassaden sind mit Ausnahme von kleinen Fenstern vollständig geschlossen. Die Süd- und in Teilen die Nordfassade bestehen aus einer Pfosten-Riegel-Konstruktion. Sie beinhaltet vertikale Öffnungsbänder sowie opake, gedämmte Paneele, welche den Stahlbeton-Wänden vorgestellt sind.

Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über einen Gas-Brennwertkessel. Über die Lüftungsanlage wird in den Sommermonaten gekühlt.

### 4.2.3 Projekt C

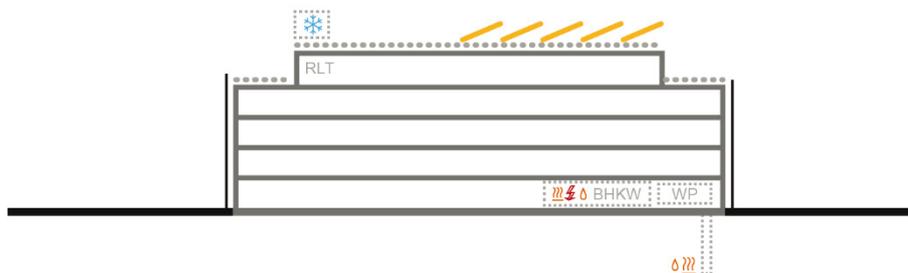


Abbildung 4-3: Gebäudeschema Projekt C (eigene Darstellung)

Das Gebäude C ist ein fünfgeschossiges Büro- und Verwaltungsgebäude (NGF 15.000 m<sup>2</sup>) mit integrierten Umkleidetrakt. Des Weiteren verfügt das Gebäude über einen Fitnessbereich, eine Kindertagesstätte und eine Mensa für die Mitarbeiter

Das Gebäude ist als Massivbau in Stahlbetonbauweise ausgeführt. Die streng gerasterte Lochfassade ist in den opaken Bereichen mit hinterlüfteten Natursteinplatten und Betonfertigteilen verkleidet. In Teilbereichen der Fassade kommt ein mineralisches Wärmedämmverbundsystem (WDVS) zum Einsatz.

Die Wärmeversorgung des Gebäudes wird durch ein Gas-BHKW sichergestellt. Der Strom, der im BHKW hergestellt wird, wird gebäudeintern für eine Absorptionskältemaschine und für die eigene Stromversorgung verwendet und nicht in das Stromnetz eingespeist. Unterstützt werden die Systeme durch eine Solarthermieanlage und ein Erdsondenfeld.

#### 4.2.4 Projekt D

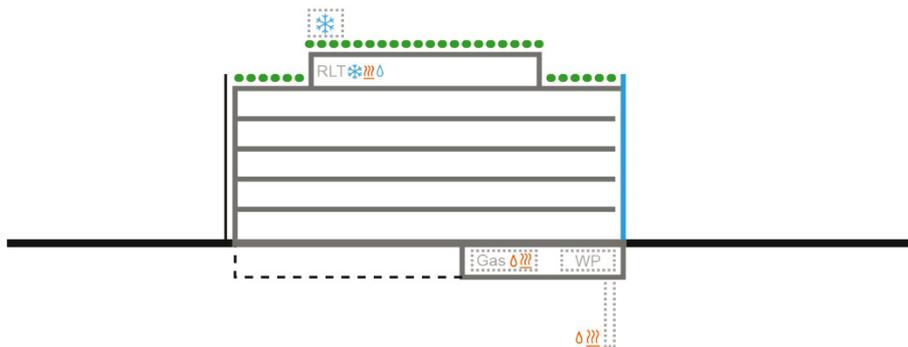


Abbildung 4-4: Gebäudeschema Projekt D (eigene Darstellung)

Das Projekt D besitzt insgesamt sechs Stockwerke und eine NGF von 13.685 m<sup>2</sup> sowie eine Tiefgarage. Das Gebäude weist eine durchgängige Büronutzung auf. Im Erdgeschoss befinden sich außerdem ein Tagungsraum sowie ein Mitarbeiterrestaurant. Die Tiefgarage wird bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt, wobei näherungsweise der Bereich der Kellerdecke anteilig als Bodenplatte erhoben wird.

Das Gebäude besitzt eine vorgehängte hinterlüftete Fassade mit einer Bekleidung aus Metallpaneelen vor einer Mineralwolldämmung. Die Fensterbänder der Regelgeschosse bestehen aus Einzelelementen, wohingegen im EG und 5.OG auch eine Pfosten-Riegel-Fassade zum Einsatz kommt.

Die Wärmeversorgung wird von zwei Wärmepumpen sowie zwei Gas-Brennwertkesseln als Spitzenlastkessel gewährleistet. Die Belüftung und Kühlung des Gebäudes ist über eine Lüftungsanlage geregelt. Das Gebäude wurde nach der EnEV 2014 bilanziert.

#### 4.2.5 Projekt E

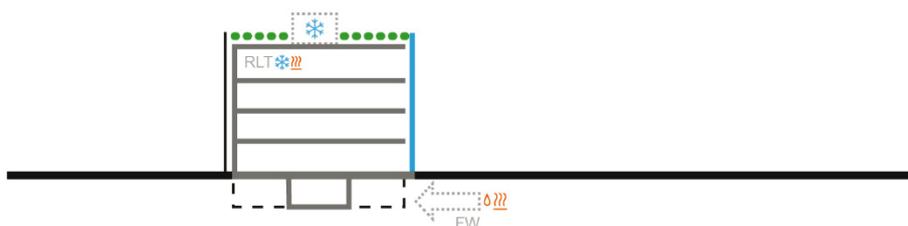


Abbildung 4-5: Gebäudeschema Projekt E (eigene Darstellung)

Das Projekt E ist ein Bürogebäude mit einer NGF von 4.500 m<sup>2</sup>. Das fünfgeschossige Gebäude steht als eigenständiger Solitär, wird aber im Erdgeschoss mit einem bereits bestehenden Gebäude verbunden. Im Erdgeschoss des befindet sich eine Mitarbeiterkantine. Des Weiteren befindet sich unter dem Gebäude eine Tiefgarage. Die Tiefgarage wird bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt, wobei näherungsweise der betreffende Bereich der Kellerdecke anteilig als Bodenplatte erhoben wird.

Die Fassade ist mineralisch gedämmt, und mit Betonwerkstein bekleidet. Diese wechselt sich mit einer Pfosten-Riegel-Konstruktion bzw. einer Glas-Aluminium-Elementfassade ab.

Die Wärmeversorgung des Gebäudes funktioniert über einen Fernwärmeanschluss. Das Gebäude wird im Sommer aktiv gekühlt und verfügt über eine Lüftungsanlage.

### 4.3 Zusammenfassung der Projekteigenschaften

Die Projekte unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Größe und ihre Geschossanzahl. Projekt A und B besitzen zwei Vollgeschosse mit einer NGF von 2.512 m<sup>2</sup> bzw. 3.039 m<sup>2</sup> und sind wie Projekt C nicht unterkellert. Projekt C ist mit einer NGF von 15.006 m<sup>2</sup> das größte betrachtete Referenzbeispiel mit insgesamt fünf Vollgeschossen. Projekt E verfügt über vier Vollgeschosse und besitzt zudem eine Unterkellerung mit einer gesamten NGF von 4.504 m<sup>2</sup>. Projekt D ist zwar mit sechs Vollgeschossen das höchste Gebäude, hat mit 13.685 m<sup>2</sup> jedoch eine etwas geringere NGF als Projekt C.

Alle Gebäude verfügen über eine vorgehängte hinterlüftete Fassade mit Fensterflächenanteilen von 26 % bis 43 %, wobei diese unterschiedlich ausgeführt wurden. Es ist also interessant, welche Auswirkungen die jeweiligen Fassadentypen auf das Gesamtergebnis haben. Die Dämmmaterialien (Mineralfasern) und der Energiestandard sind vergleichbar.

Die primäre Nutzung aller Gebäude sind Büro- bzw. Verwaltungsfunktionen. Alle Projekte außer C beinhalten außerdem eine Kantine. Projekt C hat einen vergleichbar großen Sozialbereich sowie sehr umfangreiche Umkleide- und Duschbereiche für die Mitarbeiter des anliegenden Produktionsgebäudes.

Die Wärmeversorgung erfolgt in den Projekten A und C über jeweils eine Wärmepumpe und ein Erdgas-BHKW. Auch Projekt D besitzt eine Wärmepumpe, in Kombination mit einem Erdgas-Brennwertkessel. Projekt B wird ausschließlich über einen Gas-Brennwertkessel beheizt und Projekt E hat einen Fernwärmeanschluss mit einem sehr guten Primärenergiefaktor. Weiterer Energieträger für Beleuchtung, Hilfsenergie und Kühlung ist in allen Projekten ist der durchschnittliche deutsche Strom-Mix. Der berechnete Betriebsenergiesatz ist in Kapitel 6.4.1 aufgeschlüsselt.



## 5 Projektergebnisse

Nachfolgend werden die Projektergebnisse der LCA und LCC vorgestellt und diskutiert. Um die Projekte untereinander vergleichen zu können, werden die Ergebnisse auf den m<sup>2</sup> der jeweiligen Nettogrundfläche und Jahr bezogen sowie gegliedert nach der Kostengruppe 300, 400 sowie der Betriebsphase B6 dargestellt. Die Rahmenbedingungen der Bilanzierungen sowie die Wahl der Darstellungsweisen können den Abschnitten 3.1 bis 3.4 entnommen werden.

### 5.1 Ergebnisse der LCA

Die Ergebnisse der LCA variieren je nach Bezugsgröße, Betrachtungsgrenze und Umweltwirkung. Um eine gewisse Übersicht zu wahren, liegt der Fokus auf den drei Indikatoren GWP, AP und PENRT. Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der Ergebnisvarianzen und maßgebender Einflussgrößen, um im Kapitel 7.4 Optimierungsempfehlungen für frühe Planungsphasen ableiten zu können.

#### 5.1.1 Ergebnisübersicht der LCA nach Kostengruppen

Wie Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2 zu entnehmen ist, variieren<sup>1</sup> die spezifischen Gesamtergebnisse (je m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>) der Umweltwirkungen der Projekte (KG 300 + KG 400 + B6) im Mittel

- beim GWP mit 55,0 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. ± 11,8 %,
- beim AP mit 0,091 kg SO<sub>2</sub>-Äqv. ± 5,5 % und
- beim PENRT mit 732,2 MJ ± 14,1 %.

Betrachtet man nur die KG 300 und 400 ohne die Phase B6 variiert

- das GWP im Mittel um 14,5 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. ± 6,6 %, also weniger,
- das AP um 0,037 kg SO<sub>2</sub>-Äqv. ± 15,1 %, also stärker und
- die PENRT um 170,2 MJ ± 8,1 %, ebenfalls weniger.

Insgesamt nimmt der betriebliche Energieeinsatz (Phase B6) mit den größten Einfluss und scheint so die höchsten Optimierungspotentiale aufzuweisen, obwohl die Gebäude bereits mit einem guten energetischen Standard (EnEV 2009 und besser) erbaut wurden. B6 hat

- am gesamten GWP 66 bis 80 % Anteil,
- am gesamten AP 51 bis 67 % Anteil und
- an der gesamten PENRT 70 bis 83 % Anteil.

Gleichzeitig variiert das GWP des betrieblichen Energieeinsatzes im Mittel mit 40,6 ± 18 % kg CO<sub>2</sub>-Äqv./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> und der erneuerbare Primärenergiebedarf zwischen

---

<sup>1</sup> Arithmetischer Mittelwert ± Variationskoeffizient =  $\bar{x} \pm v$

562,0 ± 20,4 % MJ deutlich. Hier gilt es deshalb, die wesentlichen Stellschrauben zu identifizieren.

Die nachfolgenden Werte dienen ferner zum Projektvergleich mit anderen Bürogebäuden, die nach BNB zertifiziert werden und einen energetischen Standard mindestens nach den Bedarfswerten der EnEV 2009 aufweisen. Deshalb sind neben dem GWP, dem AP und dem PENRT auch die Werte des erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PERT) und des gesamten Primärenergiebedarfs (PE ges.) dargestellt. Die Diskussion der strategischen Stellschrauben bei der KG 300 und 400 wird im weiteren Verlauf aus den in Kapitel 3.4, Seite 23 genannten Gründen nicht nach den Kostengruppen gegliedert geführt, sondern auf die identifizierten funktionalen Kategorien bezogen.

Tabelle 5-1: Projekte A und B: Gesamtergebnisse der LCA je m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>, gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung)

Kostengruppe (erste Ebene)	Kostengruppe (zweite Ebene)	GWP	AP	PENRT	PERT	PE ges.
		kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub>	kg SO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub>	MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub>	MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub>	MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub>
<b>Projekt A</b>						
300	<b>Bauwerk - Baukonstruktionen</b>					
	Σ KG 320	2,99E+00	5,58E-03	3,14E+01	2,45E+00	3,39E+01
	Σ KG 330	2,40E+00	7,30E-03	2,88E+01	4,01E+00	3,28E+01
	Σ KG 340	1,01E+00	2,41E-03	1,18E+01	1,46E+00	1,32E+01
	Σ KG 350	2,66E+00	5,15E-03	2,46E+01	2,34E+00	2,70E+01
	Σ KG 360	2,56E+00	4,30E-03	2,95E+01	2,10E+00	3,16E+01
	<b>Σ KG 300</b>	<b>1,16E+01</b>	<b>2,47E-02</b>	<b>1,26E+02</b>	<b>1,24E+01</b>	<b>1,38E+02</b>
400	<b>Bauwerk - Technische Anlagen</b>					
	Σ KG 410	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Σ KG 420	1,25E-01	5,62E-04	1,60E+00	1,71E-01	1,77E+00
	Σ KG 430	9,82E-02	3,96E-04	1,23E+00	1,91E-01	1,43E+00
	20 % Aufschlag	2,37E+00	5,14E-03	2,58E+01	2,55E+00	2,83E+01
	<b>Σ KG 400</b>	<b>2,59E+00</b>	<b>6,10E-03</b>	<b>2,86E+01</b>	<b>2,91E+00</b>	<b>3,15E+01</b>
<b>Nutzung Betrieblicher Energieeinsatz</b>						
	<b>Σ Phase B6</b>	<b>4,17E+01</b>	<b>6,03E-02</b>	<b>5,88E+02</b>	<b>1,32E+02</b>	<b>7,20E+02</b>
<b>Σ KG 300+400+B6</b>		<b>5,59E+01</b>	<b>9,11E-02</b>	<b>7,43E+02</b>	<b>1,47E+02</b>	<b>8,90E+02</b>
	%-Anteil KG 300	21%	27%	17%	8%	16%
	%-Anteil KG 400	5%	7%	4%	2%	4%
	%-Anteil B6	75%	66%	79%	90%	81%
<b>Projekt B</b>						
300	<b>Bauwerk - Baukonstruktionen</b>					
	Σ KG 320	2,39E+00	4,71E-03	2,60E+01	2,27E+00	2,82E+01
	Σ KG 330	3,20E+00	9,80E-03	3,61E+01	2,87E+00	3,90E+01
	Σ KG 340	6,83E-01	2,08E-03	9,53E+00	2,23E+00	1,18E+01
	Σ KG 350	1,46E+00	2,96E-03	1,55E+01	1,51E+00	1,70E+01
	Σ KG 360	2,99E+00	6,13E-03	4,17E+01	6,62E+00	4,83E+01
	<b>Σ KG 300</b>	<b>1,07E+01</b>	<b>2,57E-02</b>	<b>1,29E+02</b>	<b>1,55E+01</b>	<b>1,44E+02</b>
400	<b>Bauwerk - Technische Anlagen</b>					
	Σ KG 410	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Σ KG 420	2,75E-02	1,39E-04	3,55E-01	3,52E-02	3,90E-01
	Σ KG 430	7,20E-03	2,78E-05	9,38E-02	1,54E-02	1,09E-01
	20 % Aufschlag	2,15E+00	5,17E-03	2,59E+01	3,11E+00	2,90E+01
	<b>Σ KG 400</b>	<b>2,19E+00</b>	<b>5,34E-03</b>	<b>2,63E+01</b>	<b>3,16E+00</b>	<b>2,95E+01</b>
<b>Nutzung Betrieblicher Energieeinsatz</b>						
	<b>Σ Phase B6</b>	<b>5,24E+01</b>	<b>6,30E-02</b>	<b>7,70E+02</b>	<b>1,25E+02</b>	<b>8,96E+02</b>
<b>Σ KG 300+400+B6</b>		<b>6,53E+01</b>	<b>9,41E-02</b>	<b>9,25E+02</b>	<b>1,44E+02</b>	<b>1,07E+03</b>
	%-Anteil KG 300	16%	27%	14%	11%	13%
	%-Anteil KG 400	3%	6%	3%	2%	3%
	%-Anteil B6	80%	67%	83%	87%	84%

Tabelle 5-2: Projekte C, D und E: Gesamtergebnisse der LCA je m<sup>2</sup>NGFa, gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung)

Kostengruppe (erste Ebene)	Kostengruppe (zweite Ebene)	GWP		AP		PENRT		PERT		PE ges.	
		kg CO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>		kg SO <sub>2</sub> -Äqv./m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>		MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>		MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>		MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	
<b>Projekt C</b>											
	<b>300</b>	<b>Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
		Σ KG 320	1,78E+00		3,59E-03	2,14E+01		2,16E+00		2,36E+01	
		Σ KG 330	2,97E+00		1,06E-02	3,68E+01		7,41E+00		4,42E+01	
		Σ KG 340	2,23E+00		4,61E-03	2,20E+01		3,89E+00		2,59E+01	
		Σ KG 350	3,40E+00		6,92E-03	4,13E+01		3,67E+00		4,50E+01	
		Σ KG 360	1,44E+00		2,28E-03	2,17E+01		1,79E+00		2,35E+01	
		<b>Σ KG 300</b>	<b>1,18E+01</b>		<b>2,80E-02</b>	<b>1,43E+02</b>		<b>1,89E+01</b>		<b>1,62E+02</b>	
	<b>400</b>	<b>Bauwerk - Technische Anlagen</b>									
		Σ KG 410	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00		0,00E+00	
		Σ KG 420	3,69E-02		1,89E-04	4,84E-01		7,34E-02		5,57E-01	
		Σ KG 430	2,81E-01		1,01E-03	3,68E+00		4,87E-01		4,16E+00	
		20 % Aufschlag	2,43E+00		5,84E-03	2,95E+01		3,90E+00		3,34E+01	
		<b>Σ KG 400</b>	<b>2,74E+00</b>		<b>7,05E-03</b>	<b>3,37E+01</b>		<b>4,46E+00</b>		<b>3,81E+01</b>	
	<b>Nutzung</b>	<b>Betrieblicher Energieeinsatz</b>									
		<b>Σ Phase B6</b>	<b>3,49E+01</b>		<b>4,77E-02</b>	<b>5,00E+02</b>		<b>1,01E+02</b>		<b>6,01E+02</b>	
		<b>Σ KG 300+400+B6</b>	<b>4,95E+01</b>		<b>8,27E-02</b>	<b>6,77E+02</b>		<b>1,25E+02</b>		<b>8,02E+02</b>	
		%-Anteil KG 300	24%		34%	21%		15%		20%	
		%-Anteil KG 400	6%		9%	5%		4%		5%	
		%-Anteil B6	71%		58%	74%		81%		75%	
<b>Projekt D</b>											
	<b>300</b>	<b>Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
		Σ KG 320	1,35E+00		2,26E-03	1,49E+01		1,28E+00		1,62E+01	
		Σ KG 330	4,55E+00		1,58E-02	5,91E+01		1,19E+01		7,10E+01	
		Σ KG 340	2,47E+00		6,97E-03	2,75E+01		5,04E+00		3,25E+01	
		Σ KG 350	3,34E+00		7,74E-03	3,44E+01		3,44E+00		3,78E+01	
		Σ KG 360	1,07E+00		2,57E-03	1,76E+01		5,79E+00		2,34E+01	
		<b>Σ KG 300</b>	<b>1,28E+01</b>		<b>3,54E-02</b>	<b>1,53E+02</b>		<b>2,75E+01</b>		<b>1,81E+02</b>	
	<b>400</b>	<b>Bauwerk - Technische Anlagen</b>									
		Σ KG 410	4,01E-02		1,74E-04	5,13E-01		5,60E-02		5,69E-01	
		Σ KG 420	4,01E-02		1,74E-04	5,13E-01		5,60E-02		5,69E-01	
		Σ KG 430	3,39E-01		1,15E-03	4,53E+00		5,51E-01		5,08E+00	
		20 % Aufschlag	2,64E+00		7,37E-03	3,18E+01		5,63E+00		3,74E+01	
		<b>Σ KG 400</b>	<b>3,06E+00</b>		<b>8,87E-03</b>	<b>3,73E+01</b>		<b>6,29E+00</b>		<b>4,36E+01</b>	
	<b>Nutzung</b>	<b>Betrieblicher Energieeinsatz</b>									
		<b>Σ Phase B6</b>	<b>3,11E+01</b>		<b>4,52E-02</b>	<b>4,38E+02</b>		<b>9,90E+01</b>		<b>5,37E+02</b>	
		<b>Σ KG 300+400+B6</b>	<b>4,69E+01</b>		<b>8,95E-02</b>	<b>6,29E+02</b>		<b>1,33E+02</b>		<b>7,62E+02</b>	
		%-Anteil KG 300	27%		40%	24%		21%		24%	
		%-Anteil KG 400	7%		10%	6%		5%		6%	
		%-Anteil B6	66%		51%	70%		75%		71%	
<b>Projekt E</b>											
	<b>300</b>	<b>Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
		Σ KG 320	1,90E+00		3,28E-03	1,81E+01		1,93E+00		2,00E+01	
		Σ KG 330	3,76E+00		1,31E-02	4,70E+01		6,86E+00		5,39E+01	
		Σ KG 340	1,65E+00		6,49E-03	2,14E+01		2,30E+00		2,37E+01	
		Σ KG 350	3,04E+00		6,65E-03	3,01E+01		3,24E+00		3,33E+01	
		Σ KG 360	1,10E+00		1,97E-03	1,60E+01		2,34E+00		1,83E+01	
		<b>Σ KG 300</b>	<b>1,15E+01</b>		<b>3,15E-02</b>	<b>1,33E+02</b>		<b>1,67E+01</b>		<b>1,49E+02</b>	
	<b>400</b>	<b>Bauwerk - Technische Anlagen</b>									
		Σ KG 410	6,51E-04		3,33E-06	8,39E-03		6,17E-04		9,01E-03	
		Σ KG 420	2,11E-02		1,08E-04	2,71E-01		2,00E-02		2,91E-01	
		Σ KG 430	8,99E-01		3,35E-03	1,16E+01		1,59E+00		1,32E+01	
		20 % Aufschlag	2,47E+00		6,99E-03	2,89E+01		3,66E+00		3,26E+01	
		<b>Σ KG 400</b>	<b>3,40E+00</b>		<b>1,05E-02</b>	<b>4,08E+01</b>		<b>5,27E+00</b>		<b>4,61E+01</b>	
	<b>Nutzung</b>	<b>Betrieblicher Energieeinsatz</b>									
		<b>Σ Phase B6</b>	<b>4,27E+01</b>		<b>5,56E-02</b>	<b>5,14E+02</b>		<b>7,24E+01</b>		<b>5,86E+02</b>	
		<b>Σ KG 300+400+B6</b>	<b>5,76E+01</b>		<b>9,76E-02</b>	<b>6,87E+02</b>		<b>9,44E+01</b>		<b>7,81E+02</b>	
		%-Anteil KG 300	20%		32%	19%		18%		19%	
		%-Anteil KG 400	6%		11%	6%		6%		6%	
		%-Anteil B6	74%		57%	75%		77%		75%	

### 5.1.2 Ergebnisübersicht der LCA nach funktionalen Kategorien

Die Gliederung in funktionale Kategorien soll die Identifizierung der maßgebenden Stellschrauben der KG 300 und 400 unterstützen. Da bei der KG 400 nur die Energieerzeuger bilanziert werden und die restlichen Komponenten lediglich über einen 20 %-igen Zuschlag auf das Gesamtergebnis berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.1.2), können hier die Umweltwirkungen nicht separat zugewiesen werden. Deshalb wird die KG 400 als funktionale Kategorie im Gesamten betrachtet. Eine detaillierte Darstellung möglicher Einzelergebnisse der KG 400 erfolgt in Kapitel 6.3 beispielhaft an Hand des Projektes A.

#### 5.1.2.1 GWP

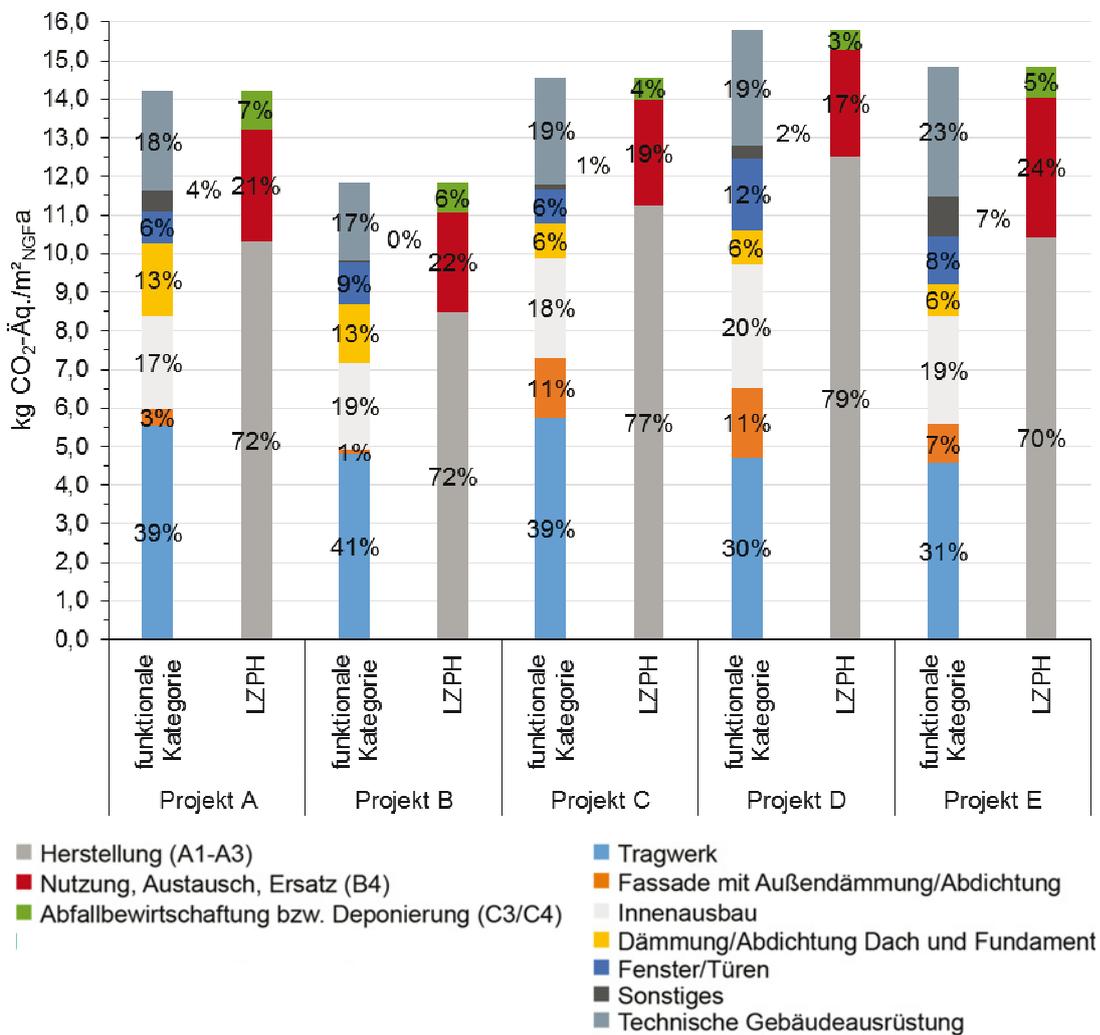


Abbildung 5-1: LCA Projektergebnisse – kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>NGFa je funktionaler Kategorie und Lebenszyklusphase (LZPH) (eigene Darstellung)

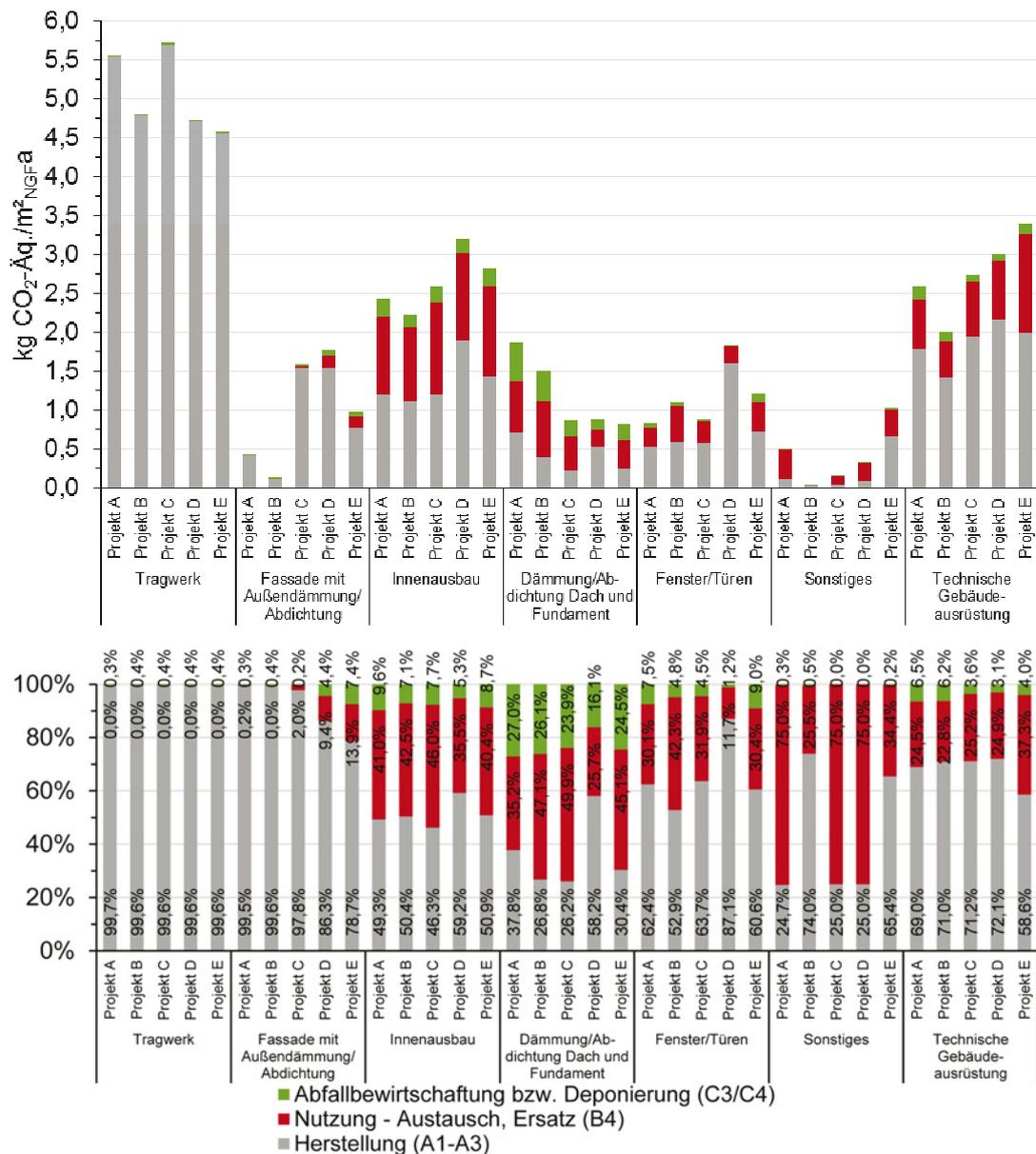


Abbildung 5-2: LCA Projektergebnisse – kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> je LZPH innerhalb der funktionalen Kategorien; spezifisch und prozentual (eigene Darstellung)

Vergleicht man die Projektergebnisse für das kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> in Abbildung 5-1, wird deutlich, dass die Gesamtverteilungen der LZPH je Projekt relativ ähnlich sind:

- Herstellungsphase (A1-A3): 72 bis 79 %
- Nutzung – Austausch, Ersatz (B4): 17 % bis 24 %
- Abfallbewirtschaftung bzw. Deponierung (C3/C4): 3 % bis 7 %

Das Tragwerk bestimmt dabei die Herstellungsphase. Bei Projekt E beispielsweise verursacht das Tragwerk ca. 44 % der Treibhausgasemissionen in der Herstellungsphase, was auf den hohen Massenanteil der Stahlbetonmassivbauweise zurückzuführen ist.

Maßgebender Treiber der Phase B4 sind der Innenausbau und die technische Gebäudeausrüstung (vgl. Abbildung 5-2). Nahezu 36 % der Emissionen fallen im Innenausbau auf den Austausch zurück, bei der TGA sind es mindestens 23 %. Auch bei den Fenstern und Türen hat die Phase B4, außer bei Projekt D, einen großen Einfluss

(> 30 %). Die Fenster und Türen verursachen beim Projekt D deutlich mehr kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> bei der Herstellung. Grund dafür ist der hohe Fensterflächenanteil. Die höheren Emissionen werden daher vom Tragwerk weg hin zu den Fenster und Türen verlagert.

Projekt B spart sich durch konstruktive Maßnahmen größtenteils die Emissionen in KG 338 („Sonstiges“) ein. Diese werden hauptsächlich durch ein außenliegendes gelochtes Stahlfeinblech als Sonnenschutz verursacht. Die anderen Projekte sind hingegen i.d.R. mit Sonnenschutzlamellen aus Aluminium ausgestattet.

### 5.1.2.2 PENRT

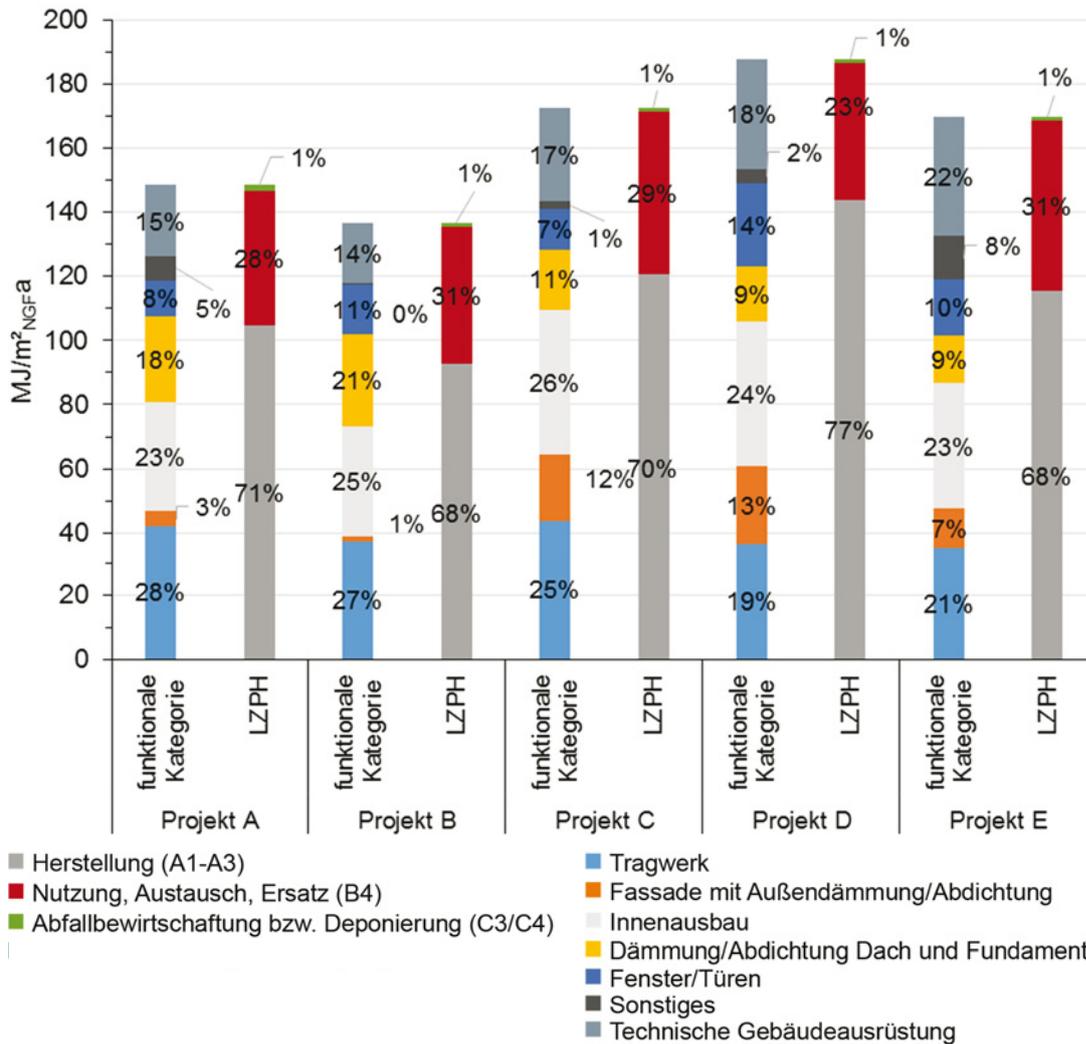


Abbildung 5-3: LCA Projektergebnisse – MJ/m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> je funktionaler Kategorie und Lebenszyklusphase (LZPH) (eigene Darstellung)

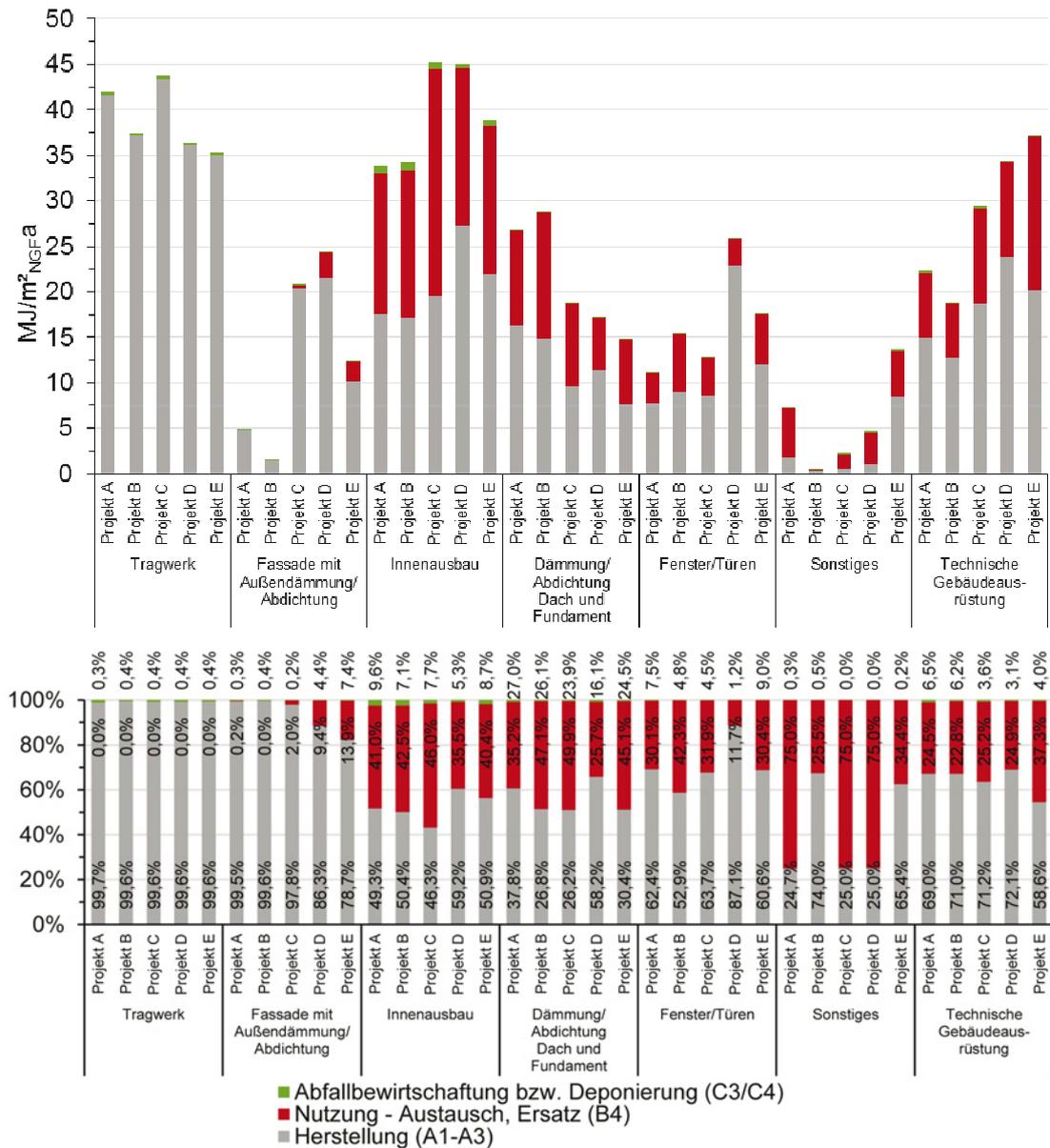


Abbildung 5-4: LCA Projektergebnisse – MJ/m²<sub>NGfa</sub> je LZPH innerhalb der funktionalen Kategorien; spezifisch und prozentual (eigene Darstellung)

Die prozentuale Verteilung der nicht erneuerbaren Primärenergie auf die einzelnen funktionalen Kategorien und Lebenszyklusphasen verhalten sich relativ ähnlich wie die Verteilungen beim GWP:

- Herstellungsphase (A1-A3): 68 bis 77 %
- Nutzung – Austausch, Ersatz (B4): 23 bis 31 %
- Abfallbewirtschaftung bzw. Deponierung (C3/C4): 1 %

Lediglich der Innenausbau und die Fenster nehmen hier mehr Einfluss. Parallel nimmt der Einfluss des Tragwerks ab (vgl. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-3).

Der nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch der Entsorgungsphase ist vernachlässigbar gering. Er wird hauptsächlich durch den Innenausbau festgelegt.

5.1.2.3 AP

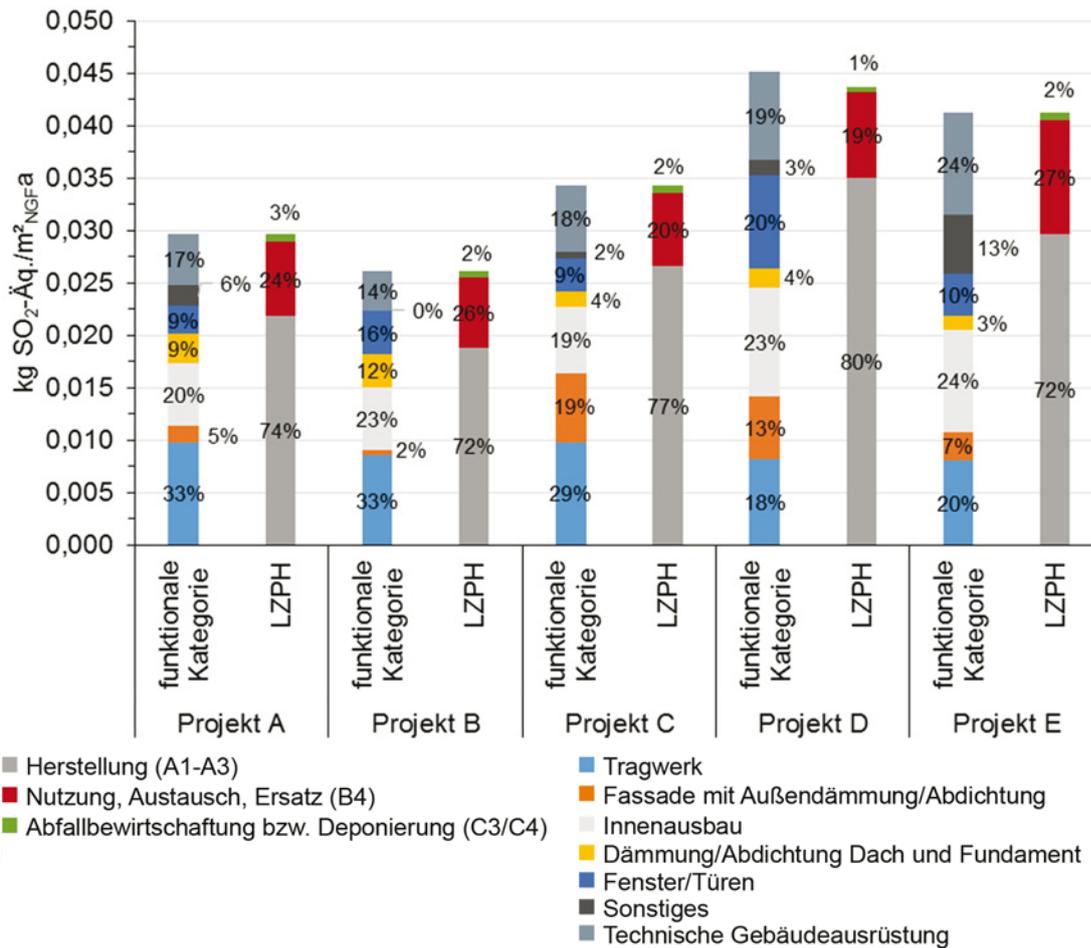


Abbildung 5-5: LCA Projektergebnisse – kg SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> je funktionaler Kategorie und Lebenszyklusphase (LZPH) (eigene Darstellung)

Das Tragwerk bleibt auch beim AP der wesentliche Treiber mit durchschnittlich 26,6 %, gefolgt vom Innenausbau mit 21,8 %. Das Versauerungspotential, ausgedrückt in kg SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> kann bis zu 20 % von den Fenster und Türen verursacht werden (Projekt D). Auch die Fassade stellt einen Treiber dar: 19 % des kg SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> fallen im Projekt C auf die Fassaden mit Außendämmung und Abdichtung. Im Projekt E ist das AP in der Kategorie „Sonstiges“ signifikant größer als bei den anderen Projekten. Grund ist der berücksichtigte Zaun aus Edelstahl, der sich auf dem Dach des Projektes befindet und die technischen Anlagen schützt.

Insgesamt ist die Verteilung des AP vergleichbar mit der des GWP und der PENRT:

- Herstellungsphase (A1-A3): 72 bis 80 %
- Nutzung – Austausch, Ersatz (B4): 19 bis 27 %
- Abfallbewirtschaftung bzw. Deponierung (C3/C4): 1 bis 3 %

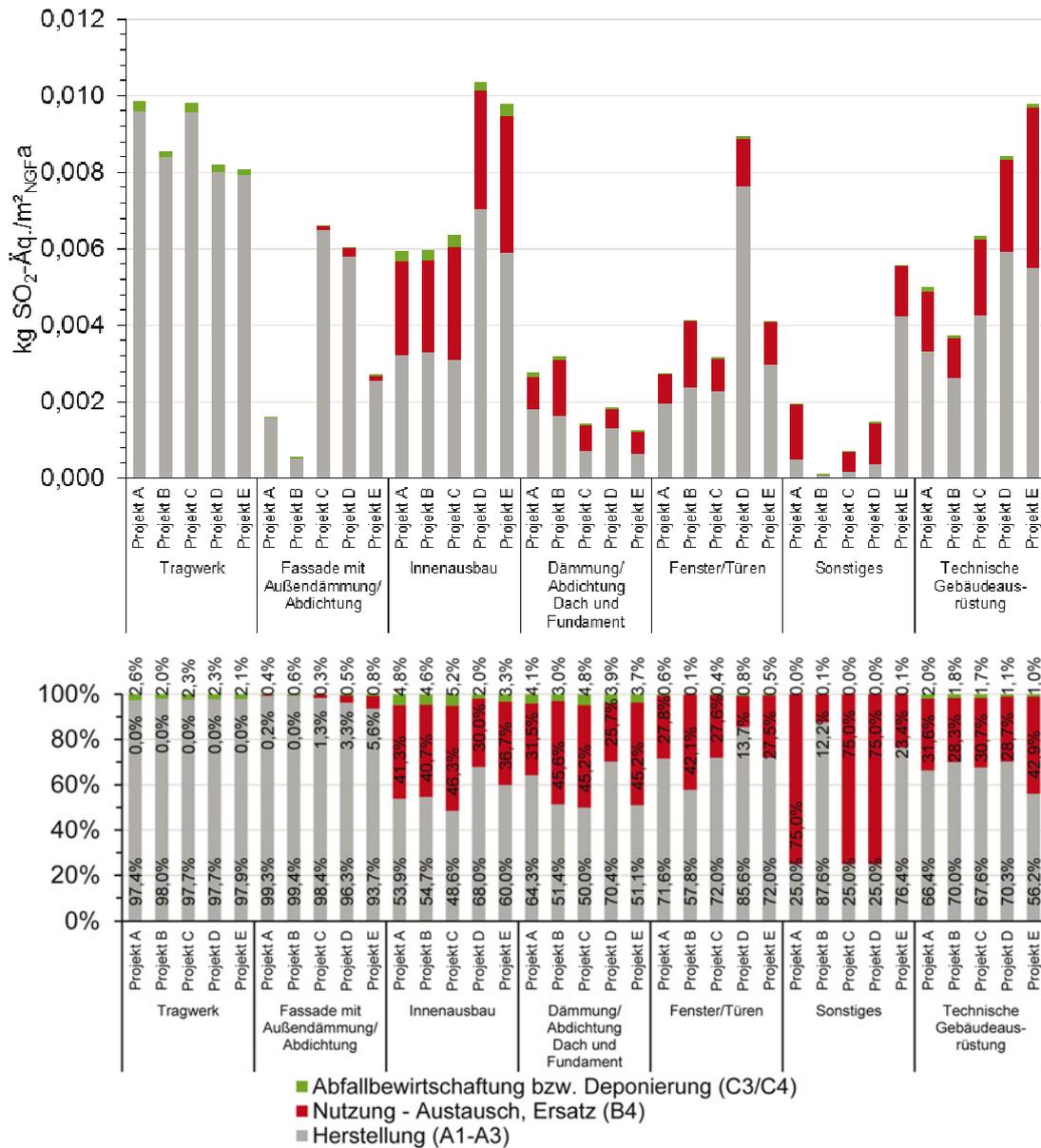


Abbildung 5-6: LCA Projektergebnisse – kg SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> je LZPH innerhalb der funktionalen Kategorien; spezifisch und prozentual (eigene Darstellung)

### 5.1.3 Ergebnisübersicht Betriebsenergie

Die LZPH B6 (Betrieb) verursacht über den gesamten Lebenszyklus von 50 Jahren trotz des guten Energiestands der Projekte den größten Teil der Umweltwirkungen.

Es fällt auf, dass das Projekt D in B6 insgesamt die geringsten und Projekt B die höchsten spezifischen Umweltwirkungen aufweist. Projekt A nimmt sowohl beim AP als auch beim PENRT die zweithöchsten Werte ein. Im weiteren Verlauf (vgl. Kapitel 6.4) wird geprüft, inwieweit einzelne Treiber des Energiebedarfs oder die Wahl der Energieträger relevanter für das Gesamtergebnis sind.

5.1.3.1 GWP

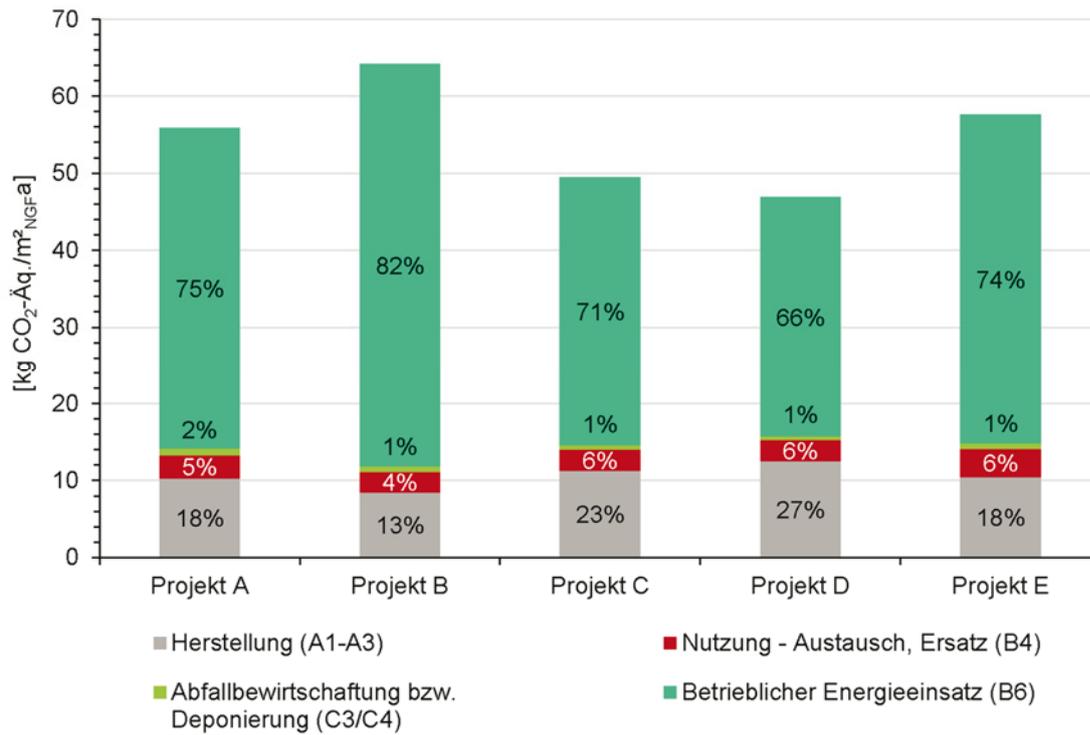


Abbildung 5-7: LCA Projektergebnisse – GWP in kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

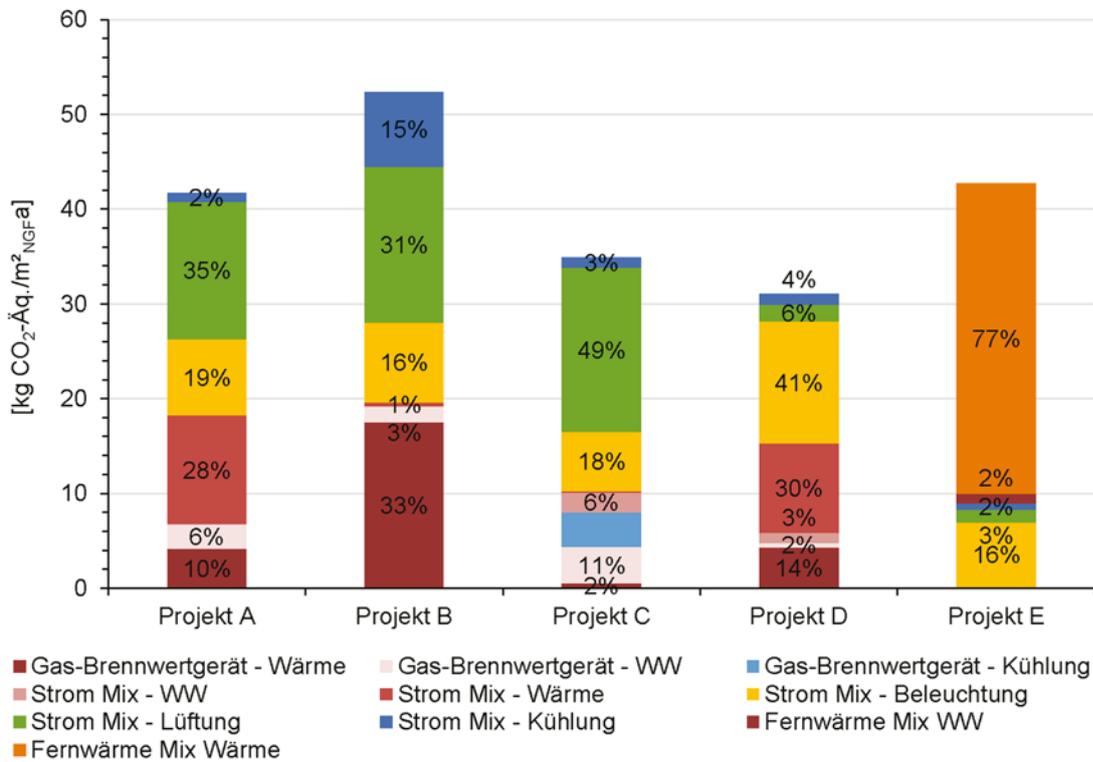


Abbildung 5-8: LCA Projektergebnisse – GWP in kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> der Phase B6 aufgeteilt nach Energiebedarf und Energieträgern (eigene Darstellung)

Die Phase B6 verursacht zwischen 31,1 kg (Projekt D) und 52,4 kg (Projekt B) CO<sub>2</sub>-Äq. /m<sup>2</sup> a.

Eine Aufteilung auf die unterschiedlichen Bedarfs- und Energieträgerarten zeigt, dass der Wärmebedarf den größten Anteil am GWP verursacht. Eine Ausnahme stellt das Projekt C dar, bei dem der Strombedarf für die Lüftung ausschlaggebend ist. Projekt A und C werden jeweils durch ein BHKW versorgt, für das in der DIN V 18599 Berechnung sehr gute Endenergiebedarfswerte für die Wärme berechnet werden, da die Abwärme der Stromerzeugung genutzt wird. Der sehr hohe Strombedarf für die Lüftung in Projekt C wird durch den ungewöhnlich hohen Anteil an Sanitärflächen verursacht und ist dadurch nicht verallgemeinerbar.

In allen Projekten erweist sich in zweiter Linie der Strombedarf für die Beleuchtung als Treiber der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der sehr hohe Beleuchtungsbedarf des Projektes D wird durch große Flächen ohne Tageslicht und relativ ineffiziente Beleuchtung mit manueller Steuerung verursacht.

Insgesamt zeigt sich, dass unter den Energieträgern der Strom ein sehr wesentlicher Treiber (63 % - 85 %) ist, mit Ausnahme von Projekt E (21 %), das mit Fernwärme versorgt wird und Strom ausschließlich zur Beleuchtung und als Hilfsenergie verwendet.

### 5.1.3.2 PENRT

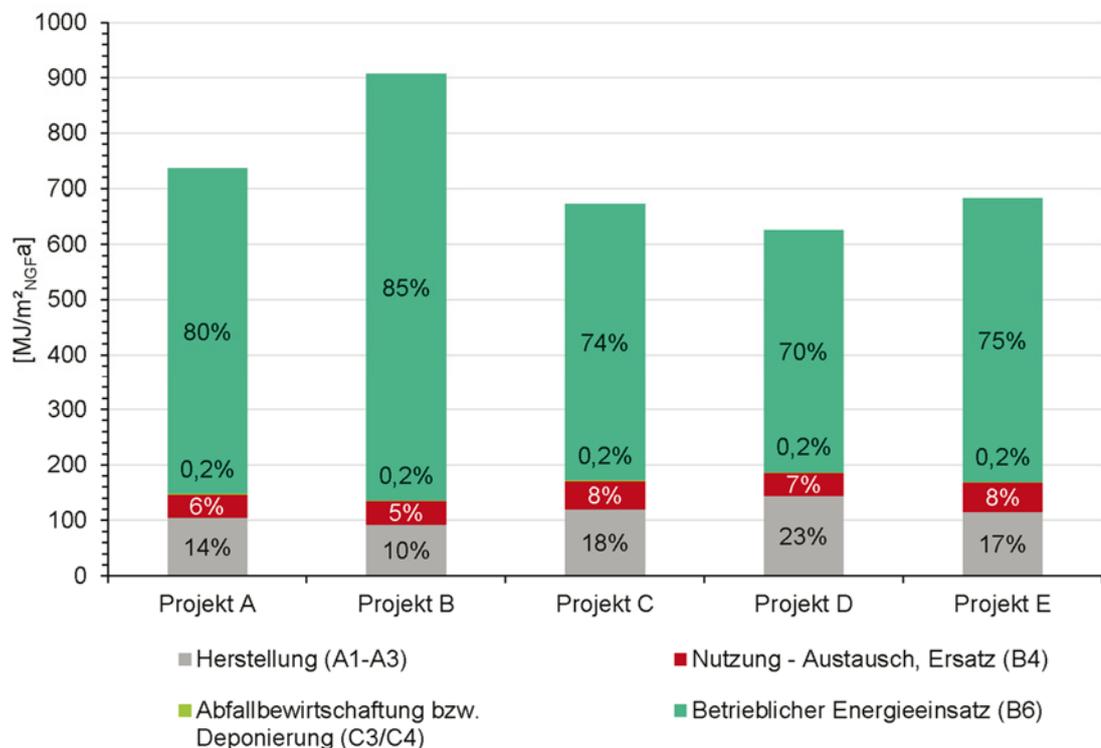


Abbildung 5-9: LCA Projektergebnisse – PENRT in MJ/m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

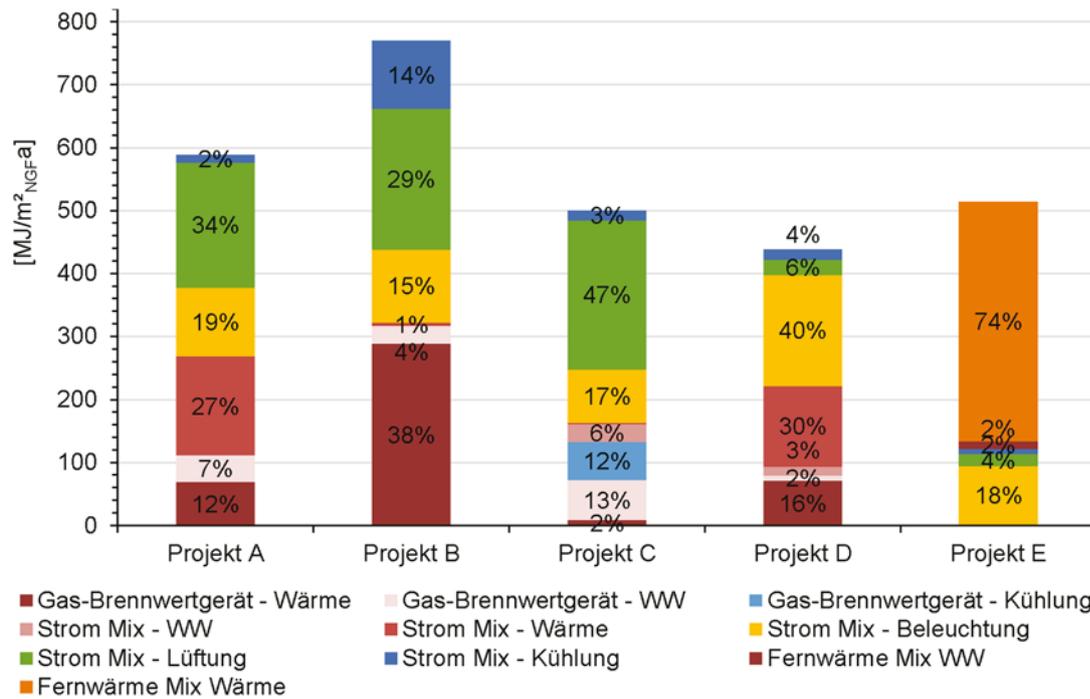


Abbildung 5-10: LCA Projektergebnisse – PENRT in MJ/m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> der Phase B6 aufgeteilt nach Energiebedarf und Energieträgern (eigene Darstellung)

Für den Gebäudebetrieb entstehen zwischen 770 (Projekt D) und 440 MJ (Projekt B) MJ /m<sup>2</sup> a nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf. Die Ergebnisse zeigen ein ähnliches Bild wie die Ergebnisse für das Treibhauspotential. Auch für PENRT ist der Bedarf für die Heizung ausschlaggebend (außer Projekt C) und in zweiter Linie die Beleuchtung.

5.1.3.3 AP

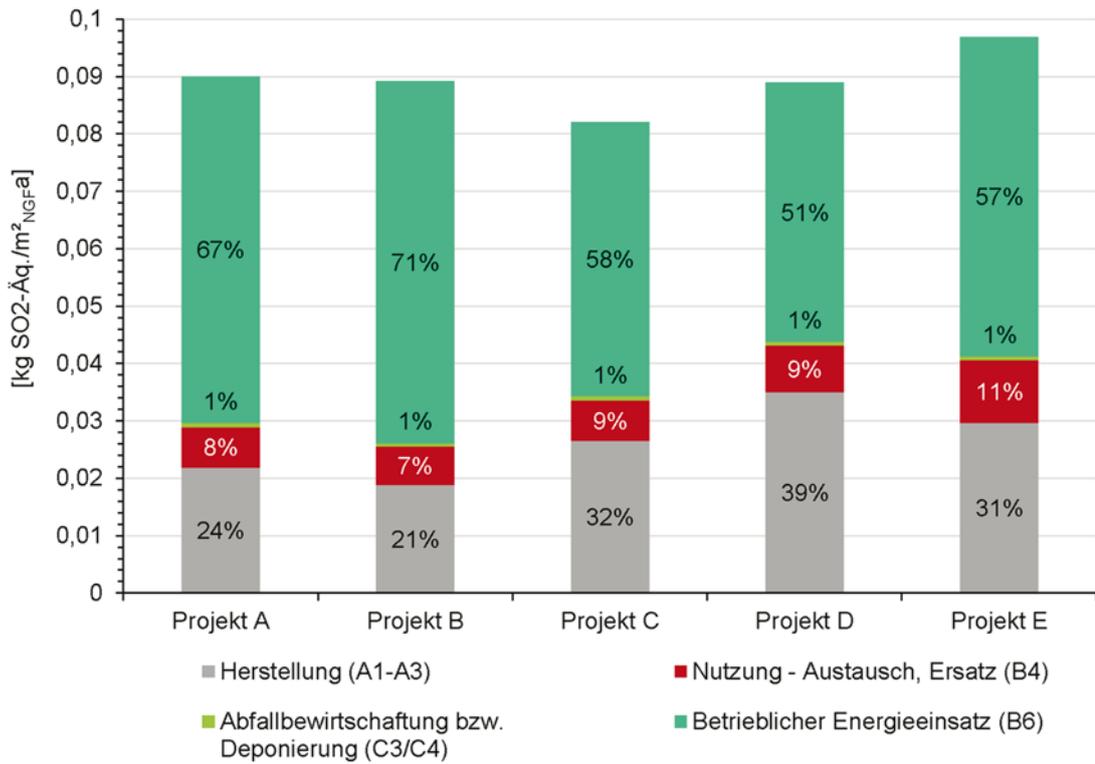


Abbildung 5-11: LCA Projektergebnisse – AP in kg SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

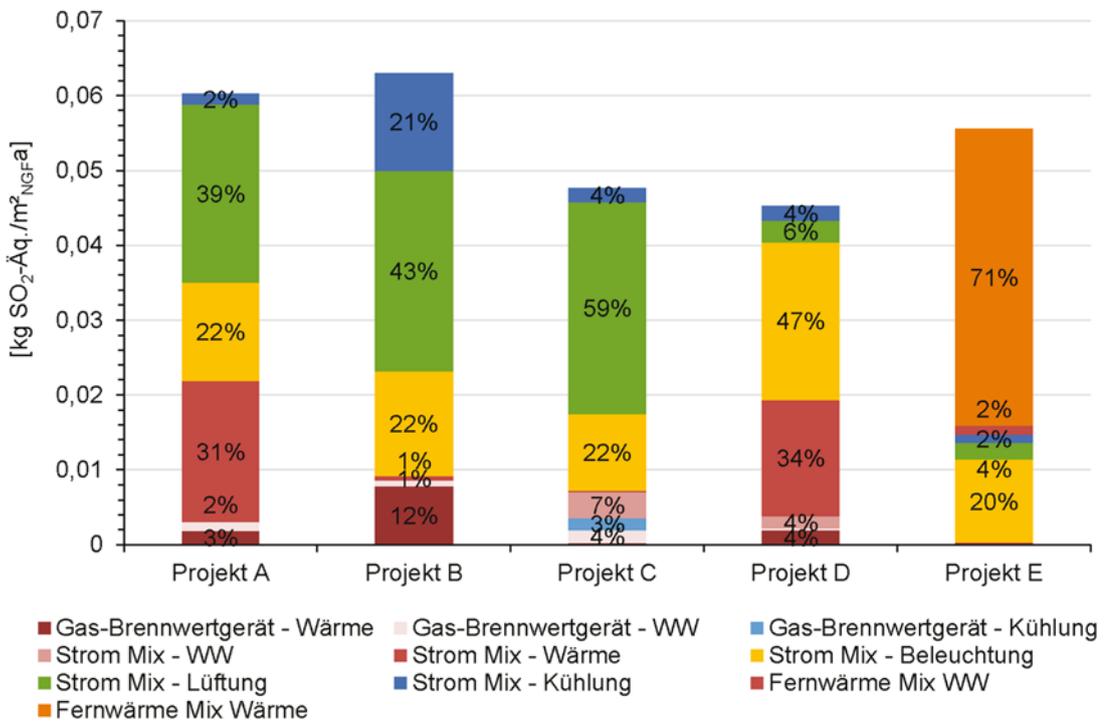


Abbildung 5-12: LCA Projektergebnisse – AP in kg SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> der Phase B6 aufgeteilt nach Energiebedarf und Energieträgern (eigene Darstellung)

Die Phase B6 verursacht zwischen 0,0438 kg (Projekt D) und 0,0630 kg (Projekt B) SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>a. Die Verhältnisse verschieben sich leicht Richtung Strombedarf der Lüftung, sind aber hinsichtlich Wärmebedarf und Beleuchtung vergleichbar mit GWP und PENRT. Ein detaillierter Vergleich des Energiebedarfs der Projekte findet sich im Kapitel 6.4.2.

#### 5.1.4 Wesentliche Merkmale und Erkenntnisse der LCA-Betrachtung

Der betriebliche Energieeinsatz ist bezogen auf den gesamten Lebenszyklus wesentlicher Treiber aller Umweltwirkungen (vgl. Kapitel 5.1.1). Das Einfluss- und Optimierungspotential der TGA wurde nach den Bilanzierungsregeln des DGNB untersucht. Der pauschale Zuschlag von 20 % auf die Energieerzeuger und die KG 300 suggeriert hier, dass durch eine ökologische Optimierung der KG 300 gleichzeitig auch die KG 400 optimiert wird. Dies trifft nicht ganz zu, zumindest weist die detaillierte Erhebung des Projektes A (Kapitel 6.3) auf einen anderen Sachverhalt hin. Die KG 430 nimmt wesentlichen Einfluss auf die KG 400, da Lüftungsrohre durch ihre Menge und hohen Metallanteil wesentlich zum GWP und zur PENRT beitragen.

Innerhalb der KG 300 bestehen verschiedene Abhängigkeiten, die nachfolgend zusammengefasst werden. Unabhängig von der Materialwahl, der Lebensdauer des Gebäudes und der Gebäudegeometrie sind das Tragwerk und der Innenausbau maßgebliche Treiber der KG 300.

##### 5.1.4.1 Tragwerk

Die funktionale Kategorie „Tragwerk“ kann als GWP-Treiber identifiziert werden. Denn 37 bis 49 % des lebenszyklusbasierten Treibhauspotentials der KG 300 wird dadurch bestimmt. Auf den PENRT ist der Einfluss des Tragwerks etwas geringer, jedoch trotzdem signifikant (durchschnittlich 24,0 %). Da die Stahlbetonskelettbauweise robust und langlebig ist, fallen die Umweltwirkungen fast ausschließlich in der Herstellungsphase an. Bei zwei Geschossen (Projekt A und B) nehmen Außenwand, Decken, Bodenplatte und Dachdecke gleichermaßen Einfluss, bei höheren Geschossezahlen steigt die Relevanz der tragenden Innenwände. Eine Optimierung in frühen Planungsphasen kann in erster Linie nur durch Materialeinsparungen oder durch die Wahl ökologischerer Baustoffe oder Bauweisen erfolgen (vgl. hierzu Kapitel 7.3.2.1). Materialeinsparungen können beispielsweise durch eine detailliertere statische Berechnung gewährleistet werden. Ökologischere Ausführungen können mit Hilfe von Hybridbauweisen (Kombination von Holz, Stahlbeton und/oder Stahl) erreicht werden. Dazu bietet sich die Durchführung von Variantenstudien in frühen Planungsphasen an.

##### 5.1.4.2 Fassade

Über alle Projekte hinweg beeinflussen die Bauteilschichten der Fassade innerhalb der KG 300 die jeweilige Umweltwirkung max. zu 23 % (Versauerungspotential). Wesentlicher Treiber ist das Aluminium als Baumaterial. Die detaillierte Planung der Fassadenausführung kann jedoch noch in späteren Planungsphasen erfolgen.

### 5.1.4.3 Innenausbau

Der Innenausbau nimmt innerhalb der KG 300 über den Lebenszyklus hinweg den zweitgrößten Einfluss auf das GWP (21 bis 25 %) und gleichauf mit dem Tragwerk den größten Einfluss auf die PENRT (23 bis 26 %), wobei die Phase B4 (Austausch und Ersatz) annähernd die gleichen Umweltwirkungen besitzt wie die Herstellungsphasen. Optimiert werden kann diese funktionale Kategorie also durch die Reduzierung von Austauschzyklen. Gleichzeitig sollte die Materialwahl bzw. dessen ökologische Wirkung überprüft werden. Dies muss allerdings nicht in frühen Planungsphasen erfolgen.

### 5.1.4.4 Dämmung und Abdichtung

Bei Dämm- und Abdichtungsmaterialien von Bodenplatte und Dachdecke erkennt man eine leichte Gebäudegeometrieabhängigkeit: mit zunehmender Geschosshöhe schwindet der Einfluss. Bei zwei Vollgeschossen sollte jedoch insbesondere die Dachabdichtung untersucht werden. Neben der Herstellungsphase bedingt die energetische Verwertung von EPS-Hartschaumplatten und Kunststoffabdichtungen in Müllverbrennungsanlagen einen erhöhten Treibhausgasausstoß. Der prozentuale Anteil der Entsorgungsphase am GWP im gesamten Lebenszyklus ist bei dieser funktionalen Kategorie der KG 300 am größten (16 bis 27 %; vgl. Abbildung 5-2). Bei den anderen funktionalen Kategorien entfallen auf diese Phase weniger als 10 % des GWP. Grundsätzlich benötigen Abdichtungen aus Bitumen und PVC einen hohen Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie in der Herstellungsphase. Das PVC ist auch maßgeblich für das AP verantwortlich. Durch die Austauschraten werden die Umweltwirkungen weiter erhöht. Es ist zu beachten, dass die Austauschraten nach den Vorgaben für die Standardnutzungsdauern nach BNB bzw. dem eLCA-Tool berechnet werden, um die Vergleichbarkeit mit anderen Projekten zu gewährleisten. So entfallen Umweltwirkungen auf den Austausch und Ersatz von Dämm- und Abdichtungsmaterialien, die in der Praxis auf Grund ihrer Lage (z.B. unterhalb von Estrichen mit einer Nutzungsdauer von 50 a) nicht einzeln ausgetauscht würden. Da es für Abdichtungsmaterialien nahezu keine ökologischen Alternativen gibt, ist das Optimierungspotential gering. Vielmehr sollte auf Langlebigkeit und auf den Einsatz ökologischer Dämmstoffe geachtet werden.

### 5.1.4.5 Fenster und Türen (innen und außen)

Größere Fensterflächenanteile bedingen offensichtlich höhere Umweltwirkungen (Projekt D). Insbesondere Aluminiumrahmenprofile beeinflussen hier, wie auch schon bei den Fassadenausführungen, wesentlich das Ergebnis. Durch geringere Austauschraten – ideal wäre kein Austausch während der Lebensdauer des Gebäudes von 50 a – können die Umweltwirkungen sichtbar reduziert werden.

#### 5.1.4.6 Sonstiges

Diese funktionale Kategorie kann in frühen Planungsphasen vernachlässigt werden. Bestimmt wird deren Einfluss durch einen hohen Metallanteil und mehrere Austauschzyklen des Sonnenschutzes.

#### 5.1.4.7 Technische Gebäudeausrüstung

Die Bilanzierung der Energieerzeuger beeinflusst die prozentualen Anteile der TGA an den Umweltwirkungen nur marginal. Vielmehr werden die Umweltwirkungen bei der vereinfachten Berechnungsmethode durch den pauschalen Zuschlag definiert. Betrachtet man allerdings die Einzelergebnisse der Kostengruppen in der zweiten Ebene (KG 410, 420 und 430) von vereinfachter und detaillierter Ermittlung kristallisiert sich die KG 430 – lufttechnische Anlagen – als wesentlicher Treiber heraus.

#### 5.1.4.8 Betrieblicher Energieeinsatz

Die Betriebsphase (B6) nimmt in den Lebenszyklusphasen eine Sonderrolle ein: Sie ist für den Großteil des GWP (> 66 %), PENRT (> 70 %) und des AP (>51 %) verantwortlich. Sie wird durch den Dämmstandard (KG 320, 330 und 360), die TGA (KG 400) und die Nutzung (Büro, Kantine, Sanitärflächen) wesentlich beeinflusst. Der große Anteil der Phase B6 über den Lebenszyklus ergibt sich auch aus der Länge des Betrachtungszeitraumes (vgl. auch Kapitel 6.1). Wesentlicher Treiber ist der Energiebedarf für die Wärmeerzeugung (vgl. Kap. 5.1.3).

#### 5.1.4.9 Zusammenhang PENRT, GWP, AP

Sucht man neben dem betrieblichen Energieeinsatz (wesentlicher Treiber) nach den Stellschrauben der KG 300 und KG 400 hin zur Optimierung des GWP, PENRT und AP, so ergeben sich nahezu die gleichen Aussagen: den größten prozentualen Anteil an den Gesamtergebnissen der KG 300 und 400 nehmen die funktionalen Kategorien Tragwerk und Innenausbau ein. Hinsichtlich der Lebenszyklusphasen sind die prozentualen Verteilungen bei GWP, PENRT und AP ebenfalls vergleichbar: in der Herstellungsphase entstehen ca. 3/4 der Umweltwirkungen der KG 300 und 400 und in der Nutzungsphase 1/5 bis 1/4. Die Entsorgungsphase spielt bei allen drei Indikatoren eine untergeordnete Rolle (< 7 %).

## 5.2 Ergebnisse der LCC

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnungen eingegangen und analysiert, wie die Unterschiede in den einzelnen Lebenszyklusphasen zu erklären sind:

Tabelle 5-3: Übersicht über LCC-Projektergebnisse – Durchschnittswerte und prozentuale Spannweiten (eigene Darstellung)

Art der Lebenszykluskosten	Durchschnittliche Kosten	Prozentuale Spannweite der Kosten
Herstellungskosten (A1-A3)	20,85 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 18 %
Betriebsenergiekosten (B6)	13,93 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 23 %
Reinigungskosten (B2)	8,75 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 24 %
Regelmäßige Inspektions- und Wartungskosten (B2)	2,13 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 78 %
Regelmäßige Instandsetzungskosten (B3)	4,12 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 24 %
Kosten für Austausch und Ersatz (B4)	9,79 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 25 %
Rückbaukosten (Austausch) (B4)	1,16 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 31 %
Rückbaukosten (Abbruch) (C1)	1,73 €/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub>	± 102 %

Im Durchschnitt betragen die errechneten Lebenszykluskosten 62,46 € auf den m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> und Jahr, wobei die Investitionskosten ein Drittel der Lebenszykluskosten definieren. An zweiter Stelle folgen die Betriebsenergiekosten, die während der gesamten Gebäudelebensdauer ca. 22 % der Gebäudekosten ausmachen. Geringen Einfluss haben die Rückbaukosten in der Entsorgungsphase, wobei hier auf Grund fehlender allgemeingültiger Quellen keine Entsorgungskosten berücksichtigt wurden.

## 5.2.1 Ergebnisübersicht der LCC nach Kostengruppen

 Tabelle 5-4: Projekte A und B: Gesamtergebnisse der LCC je m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>, gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung)

Kostengruppe (erste Ebene)	Kostengruppe (zweite Ebene)	Investitions-kosten	Betriebskosten	Reinigungs-kosten	Wartungskosten	regelmäßige Instandsetzungs-kosten	Instandsetzungs-kosten	Rückbaukosten (Austausch)	Rückbaukosten (Abbruch)	
Projekt A	<b>300 Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
		Σ KG 320	3,05 €/m <sup>2</sup> NGF a		4,50 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,04 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,63 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,85 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,11 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,36 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 330	5,67 €/m <sup>2</sup> NGF a		1,78 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,30 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,91 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,67 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,26 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,42 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 340	0,03 €/m <sup>2</sup> NGF a		1,17 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,05 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,15 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 350	3,52 €/m <sup>2</sup> NGF a		3,37 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,36 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 360	3,61 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,30 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,75 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,03 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,39 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,31 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 300	15,88 €/m <sup>2</sup> NGF a		10,82 €/m <sup>2</sup> NGF a	2,66 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,31 €/m <sup>2</sup> NGF a	5,60 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,27 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,11 €/m <sup>2</sup> NGF a
		<b>400 Bauwerk - Technische Anlagen</b>								
		Σ KG 410	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 420	0,98 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,08 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,38 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,51 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 430	0,23 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,07 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,14 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,46 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 400	1,21 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,15 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,52 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,97 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,03 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,03 €/m <sup>2</sup> NGF a
		<b>Nutzung Betrieblicher Energieeinsatz</b>								
		Σ Phase B6		13,07 €/m <sup>2</sup> NGF a						
	Σ KG 300+400+B6	17,09 €/m <sup>2</sup> NGF a	13,07 €/m <sup>2</sup> NGF a	10,82 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,81 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,83 €/m <sup>2</sup> NGF a	7,57 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,30 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,14 €/m <sup>2</sup> NGF a	
	%-Anteil KG 300	93%	0%	100%	70%	86%	74%	98%	97%	
	%-Anteil KG 400	7%	0%	0%	30%	14%	26%	2%	3%	
	%-Anteil B6	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Projekt B	<b>300 Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
		Σ KG 320	3,32 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,20 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,69 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,46 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,19 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,48 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 330	4,67 €/m <sup>2</sup> NGF a		1,95 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,28 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,97 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,66 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,14 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,85 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 340	1,95 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,05 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,12 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,40 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,33 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,09 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 350	2,37 €/m <sup>2</sup> NGF a		2,82 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,14 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,49 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,49 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,22 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,25 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 360	4,94 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,04 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,29 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,20 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,53 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,82 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 300	17,24 €/m <sup>2</sup> NGF a		4,86 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,57 €/m <sup>2</sup> NGF a	8,13 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,08 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,50 €/m <sup>2</sup> NGF a
		<b>400 Bauwerk - Technische Anlagen</b>								
		Σ KG 410	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 420	0,07 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,03 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,15 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 430	0,11 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,06 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,07 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
		Σ KG 400	0,18 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,08 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,09 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,15 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
		<b>Nutzung Betrieblicher Energieeinsatz</b>								
		Σ Phase B6		16,55 €/m <sup>2</sup> NGF a						
	Σ KG 300+400+B6	17,42 €/m <sup>2</sup> NGF a	16,55 €/m <sup>2</sup> NGF a	4,86 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,10 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,67 €/m <sup>2</sup> NGF a	8,28 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,08 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,50 €/m <sup>2</sup> NGF a	
	%-Anteil KG 300	99%	0%	100%	93%	97%	98%	99%	100%	
	%-Anteil KG 400	1%	0%	0%	7%	3%	2%	1%	0%	
	%-Anteil B6	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

Tabelle 5-5: Projekte C und D: Gesamtergebnisse der LCC je m<sup>2</sup>NGF a, gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung)

Kostengruppe (erste Ebene)	Kostengruppe (zweite Ebene)	Investitions-kosten	Betriebskosten	Reinigungs-kosten	Wartungskosten	regelmäßige Instandsetzungs-kosten	Instandsetzungs-kosten	Rückbaukosten (Austausch)	Rückbaukosten (Abbruch)
<b>Projekt C</b>									
<b>300 Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
	Σ KG 320	2,31 €/m <sup>2</sup> NGF a		2,28 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,48 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,39 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,03 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,14 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 330	3,65 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,89 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,35 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,57 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,93 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,32 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,66 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 340	5,49 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,06 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,23 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,33 €/m <sup>2</sup> NGF a	2,75 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,25 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 350	5,23 €/m <sup>2</sup> NGF a		6,47 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,08 €/m <sup>2</sup> NGF a	2,71 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,19 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,22 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 360	2,68 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,03 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,13 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,56 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,81 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,17 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,27 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 300	19,36 €/m <sup>2</sup> NGF a		9,72 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,74 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	7,58 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,71 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,53 €/m <sup>2</sup> NGF a
<b>400 Bauwerk - Technische Anlagen</b>									
	Σ KG 410	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 420	0,58 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,65 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,23 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,33 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 430	0,46 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,17 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,28 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,59 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 400	1,04 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,82 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,50 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,92 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,03 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
<b>Nutzung Betrieblicher Energieeinsatz</b>									
	Σ Phase B6		11,83 €/m <sup>2</sup> NGF a						
	Σ KG 300+400+B6	20,40 €/m <sup>2</sup> NGF	11,83 €/m <sup>2</sup> NGF	9,72 €/m <sup>2</sup> NGF	1,56 €/m <sup>2</sup> NGF	3,52 €/m <sup>2</sup> NGF	9,50 €/m <sup>2</sup> NGF	0,74 €/m <sup>2</sup> NGF	1,53 €/m <sup>2</sup> NGF
	%-Anteil KG 300	95%	0%	100%	47%	86%	80%	96%	100%
	%-Anteil KG 400	5%	0%	0%	53%	14%	20%	4%	0%
	%-Anteil B6	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Projekt D</b>									
<b>300 Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
	Σ KG 320	2,73 €/m <sup>2</sup> NGF a		1,14 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,16 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,57 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,22 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,08 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 330	6,52 €/m <sup>2</sup> NGF a		2,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,26 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,92 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,57 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,22 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,45 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 340	5,32 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,08 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,14 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,49 €/m <sup>2</sup> NGF a	2,31 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,23 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 350	5,21 €/m <sup>2</sup> NGF a		5,30 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,31 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,08 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,03 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,77 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 360	2,07 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,12 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,43 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,94 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,05 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,15 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 300	21,85 €/m <sup>2</sup> NGF a		8,52 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,99 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,48 €/m <sup>2</sup> NGF a	8,07 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,04 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,91 €/m <sup>2</sup> NGF a
<b>400 Bauwerk - Technische Anlagen</b>									
	Σ KG 410	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 420	0,27 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,07 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,11 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,48 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 430	2,56 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,46 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,53 €/m <sup>2</sup> NGF a	2,78 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,09 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,04 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 400	2,84 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,52 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,64 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,26 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,10 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,04 €/m <sup>2</sup> NGF a
<b>Nutzung Betrieblicher Energieeinsatz</b>									
	Σ Phase B6		11,04 €/m <sup>2</sup> NGF a						
	Σ KG 300+400+B6	24,69 €/m <sup>2</sup> NGF	11,04 €/m <sup>2</sup> NGF	8,52 €/m <sup>2</sup> NGF	2,52 €/m <sup>2</sup> NGF	5,12 €/m <sup>2</sup> NGF	11,33 €/m <sup>2</sup> NGF	1,15 €/m <sup>2</sup> NGF	0,96 €/m <sup>2</sup> NGF
	%-Anteil KG 300	89%	0%	100%	35%	68%	71%	91%	95%
	%-Anteil KG 400	11%	0%	0%	61%	32%	29%	9%	5%
	%-Anteil B6	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabelle 5-6: Projekt E: Gesamtergebnisse der LCC je m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>, gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung)

Kostengruppe (erste Ebene)	Kostengruppe (zweite Ebene)	Investitionskosten	Betriebskosten	Reinigungs-kosten	Wartungskosten	regelmäßige Instandsetzungs-kosten	Instandsetzungs-kosten	Rückbaukosten (Austausch)	Rückbaukosten (Abbruch)
<b>Projekt E</b>									
<b>300 Bauwerk - Baukonstruktionen</b>									
	Σ KG 320	2,48 €/m <sup>2</sup> NGF a		2,39 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,15 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,51 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,72 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,07 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,28 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 330	7,04 €/m <sup>2</sup> NGF a		1,28 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,28 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,99 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,38 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,47 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,44 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 340	5,61 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,25 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,15 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,54 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,62 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,17 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 350	4,78 €/m <sup>2</sup> NGF a		5,89 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,28 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,99 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,70 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,67 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,37 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 360	2,83 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,17 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,59 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,27 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,23 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,24 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 300	22,75 €/m <sup>2</sup> NGF a		9,82 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,04 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,62 €/m <sup>2</sup> NGF a	8,68 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,45 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,49 €/m <sup>2</sup> NGF a
<b>400 Bauwerk - Technische Anlagen</b>									
	Σ KG 410	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 420	1,31 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,32 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,51 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,93 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,01 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 430	0,58 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,33 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,35 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,62 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,05 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a
	Σ KG 400	1,89 €/m <sup>2</sup> NGF a		0,00 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,65 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,86 €/m <sup>2</sup> NGF a	3,55 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,06 €/m <sup>2</sup> NGF a	0,02 €/m <sup>2</sup> NGF a
<b>Nutzung Betrieblicher Energieeinsatz</b>									
	Σ Phase B6		17,15 €/m <sup>2</sup> NGF a						
	Σ KG 300+400+B6	24,64 €/m <sup>2</sup> NGF a	17,15 €/m <sup>2</sup> NGF a	9,82 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,68 €/m <sup>2</sup> NGF a	4,48 €/m <sup>2</sup> NGF a	12,23 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,51 €/m <sup>2</sup> NGF a	1,52 €/m <sup>2</sup> NGF a
	%-Anteil KG 300	92%	0%	100%	61%	81%	71%	96%	98%
	%-Anteil KG 400	8%	0%	0%	39%	19%	29%	4%	2%
	%-Anteil B6	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

### 5.2.2 Ergebnisübersicht der LCC nach funktionalen Kategorien

Die dargestellten Kosten sind aufgliedert in funktionale Kategorien und in die LZPH. Bei diesem Vergleich ist zu berücksichtigen, dass die Betriebsenergie nicht mit einbezogen wird. Durch die Darstellung nach funktionalen Kategorien lässt sich eine Aussage darüber treffen, welche Gebäudekomponenten die größten Kostenauswirkungen besitzen. Die Auswertung nach LZPH gibt darüber Auskunft, welche Phase und welche dem Gebäudemanagement zugeordneten Kategorien in der Nutzung die größten Kostenauswirkungen haben.

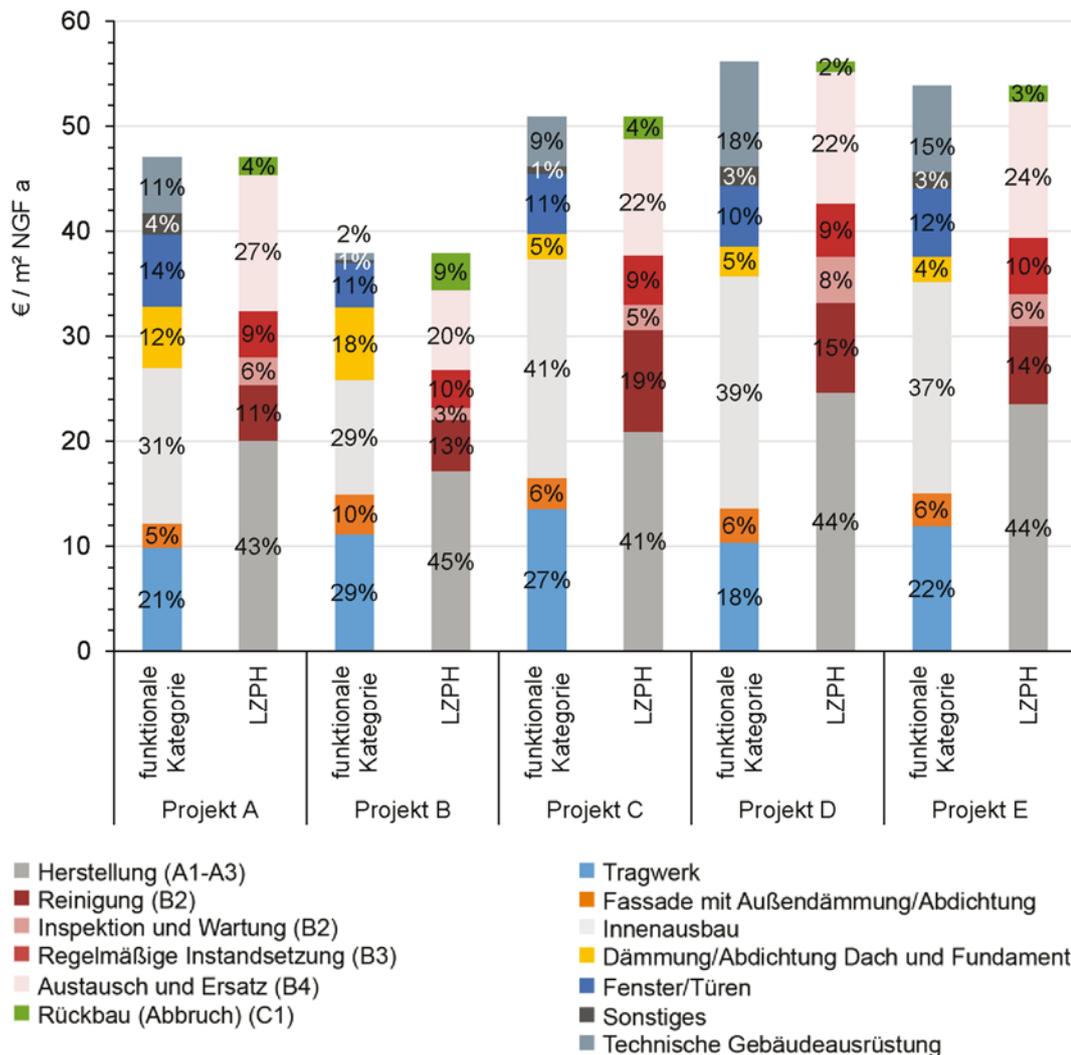


Abbildung 5-13: Vergleich der LCC nach funktionalen Kategorien und nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

Die Grafik zeigt, dass der Innenausbau, die Dämmung/Abdichtung Dach und Fundament und die Nutzungsphase (B2-B4) die relevanten Größen sind, die die Unterschiede in der Lebenszykluskostenbetrachtung ausmachen. Bei einem kleinen Gebäudevolumen mit wenigen Geschossen beispielsweise steigt der Kostenanteil für die Fassade und die Dämmung/Abdichtung von Dach und Fundament, wohingegen die Kosten für den Innenausbau sinken und umgekehrt. Untersucht man die Nutzungsphase (B2-B4) detaillierter, fällt auf, dass besonders die Instandsetzung einen großen Kostenanteil ausmacht. Dieser setzt sich aus der pauschalen Annahme der

regelmäßigen Instandsetzung (Phase B3) und dem Austausch und Ersatz (Phase B4) zusammen.

Da sowohl die Einteilung in funktionale Kategorien als auch die der Lebenszyklusphasen transparente Aussagen über die Verteilung der Lebenszykluskosten gewährleisten, folgt der Projektvergleich dieser Gliederung.

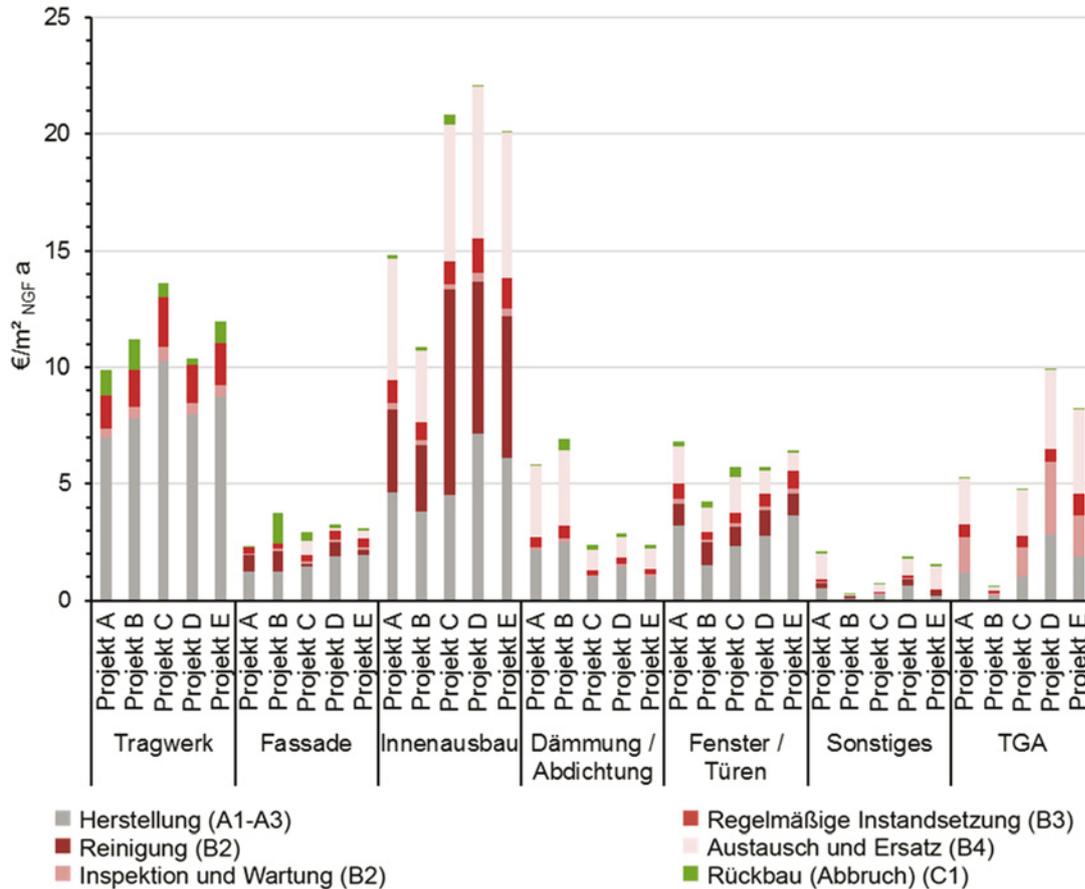


Abbildung 5-14: Vergleich der nach Lebenszyklusphasen und funktionalen Kategorien aufbereiteten Lebenszykluskosten (eigene Darstellung)

Betrachtet man die einzelnen funktionalen Kategorien, wird deutlich, dass man im Bereich des Innenausbau die größten Unterschiede in den Ergebnissen und auch das größte Einsparpotential in der Planung und in der Nutzungsphase hat. Die Lebenszykluskosten des Tragwerks unterscheiden sich je nach Größe und der Konstruktionsart (Massivbau/Skelettbau). Die Kostenverteilung bei der Fassade ist besonders in der Nutzungsphase vielen Unterschieden unterworfen. Die Reinigungskosten schwanken aufgrund der unterschiedlichen Fassadenmaterialien stark. Dies resultiert daraus, dass bestimmte Fassadenbekleidungen (z.B.: Putz, Holzschalung, etc.) nicht gereinigt werden müssen. Diese Materialien müssen allerdings häufiger erneuert oder ausgetauscht werden, wodurch höhere Kosten in Phase B4 entstehen. Auffällig ist bei dieser funktionalen Einheit, dass die Rückbaukosten (Abbruch) bei Projekt B hoch sind. Dies resultiert aus der Konstruktionsart einer Elementfassade, bei der ein selektiver Rückbau vorgenommen wird und die verwendeten Baustoffe hochwertig recycelt/wiederverwendet werden können. Der Anteil der Innenausbaukosten steigt mit dem Gebäudevolumen und weist, abgesehen von Projekt B, den größten Kostenanteil auf. Der Kostenkennwert der Dämmung und Abdichtung der Dach- und Bodenflächen ist großen Schwankungen unterworfen. Hierbei stellen sich

die spezifischen Kostenanteile von Projekt A und B wesentlich größer dar, als bei Projekt C, D und E. Dies ist auf die Geschossigkeit und die Größe der Projekte zurückzuführen.

Tabelle 5-7: Durchschnittliche prozentuale Anteile der Lebenszyklusphasen an den Lebenszykluskosten je funktionaler Kategorie inklusive der prozentualen Spannweiten (eigene Darstellung)

	Projekt A	Projekt B	Projekt C	Projekt D	Projekt E	Prozentuale Spannweite
<b>Tragwerk</b>						
Herstellungskosten (A1-A3)	70 %	70 %	76 %	77 %	73 %	± 5 %
Nutzungskosten (B2-B4)	19 %	19 %	20 %	20 %	19 %	± 5 %
Rückbaukosten (C1)	11 %	11 %	4 %	3 %	8 %	± 54 %
<b>Fassade</b>						
Herstellungskosten (A1-A3)	55 %	33 %	50 %	58 %	62 %	± 20 %
Nutzungskosten (B2-B4)	44 %	32 %	36 %	37 %	34 %	± 21 %
Rückbaukosten (C1)	0 %	35 %	13 %	5 %	4 %	± 204 %
<b>Innenausbau</b>						
Herstellungskosten (A1-A3)	32 %	35 %	22 %	32 %	30 %	± 16 %
Nutzungskosten (B2-B4)	67 %	63 %	76 %	67 %	69 %	± 11 %
Rückbaukosten (C1)	1 %	2 %	2 %	0 %	0 %	± 96 %
<b>Dämmung/Abdichtung</b>						
Herstellungskosten (A1-A3)	37 %	36 %	42 %	51 %	44 %	± 21 %
Nutzungskosten (B2-B4)	62 %	57 %	49 %	44 %	50 %	± 18 %
Rückbaukosten (C1)	2 %	7 %	9 %	5 %	6 %	± 53 %
<b>Fenster/Türen</b>						
Herstellungskosten (A1-A3)	47 %	35 %	41 %	48 %	56 %	± 24 %
Nutzungskosten (B2-B4)	49 %	59 %	51 %	49 %	42 %	± 18 %
Rückbaukosten (C1)	4 %	6 %	8 %	3 %	2 %	± 75 %
<b>Sonstiges</b>						
Herstellungskosten (A1-A3)	27 %	32 %	40 %	34 %	13 %	± 37 %
Nutzungskosten (B2-B4)	69 %	60 %	56 %	62 %	81 %	± 23 %
Rückbaukosten (C1)	4 %	8 %	4 %	4 %	6 %	± 52 %
<b>TGA</b>						
Herstellungskosten (A1-A3)	23 %	30 %	22 %	29 %	23 %	± 18 %
Nutzungskosten (B2-B4)	77 %	70 %	78 %	71 %	77 %	± 5 %
Rückbaukosten (C1)	1 %	1 %	0 %	0 %	0 %	± 50 %

Betrachtet man die prozentualen Abweichungen der Kostenkennwerte vom Projektmittelwert (siehe obige Tabelle) fällt auf, dass diese, abgesehen von den Nutzungs- und Investitionskosten des Tragwerks, eine große Spannweite besitzen. Besonders auffällig ist die Spannweite beim Gebäuderückbau bzw. -abbruch, da an diesen unterschiedlich herangegangen werden kann. Betrachtet man die Abweichungen grafisch (vgl. Abbildung 5-15), kann man die großen Abweichungen der LZPH-Kostenanteile im Detail erklären. Die LZPH der Tragwerke haben über alle Projekte hinweg ähnliche prozentuale Anteile. Auch die Fassade weist eine homogene Verteilung der Kosten auf, wenn man den Rückbau von Projekt B außer Acht lässt. Ferner fällt das Projekt C im Bereich der Nutzungskosten des Innenausbaus auf, wobei sich der hohe Kostenanteil durch die hohen Reinigungskosten für die Umkleidebereiche erklären lässt. Alle anderen Projekte weisen auch hier eine homogene Verteilung der Kostenanteile auf.

In der funktionalen Einheit der Dämmung und Abdichtung von Dach und Fundament fällt der Sprung der Anteile bei steigendem Gebäudevolumen auf. Die Kostenkennwerte für die Fenster und Türen weisen große Unterschiede auf. Die Unterschiede können auf die unterschiedlichen Fenstertypen (Beispiel: Pfostenriegelfassaden mit automatischen Lüftungsclappen, oder ein Standardfenster mit Öffnungsflügel) und auf Türen mit und ohne automatischen Türöffnern zurückgeführt werden.

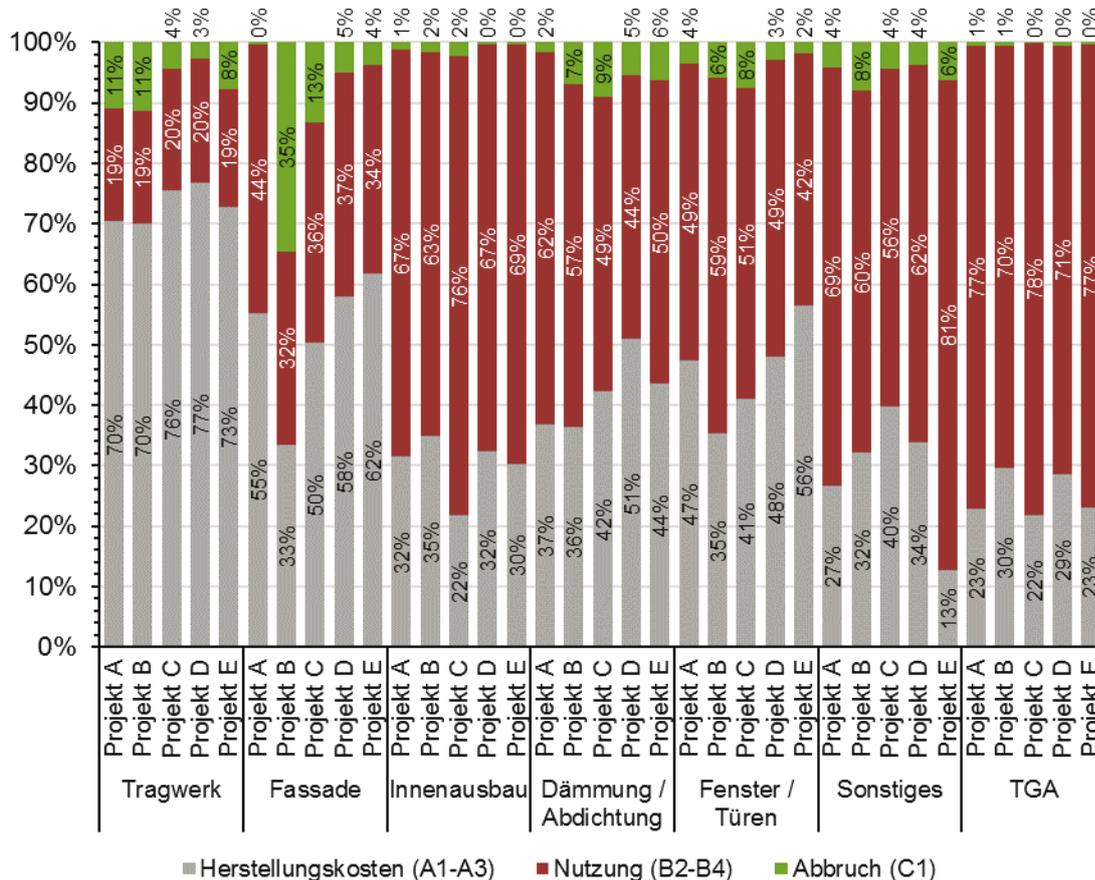


Abbildung 5-15: Vergleich der prozentualen Anteile der Lebenszyklusphasen an der LCC (eigene Darstellung)

In Abbildung 5-16 sind die Nutzungsphasen aufgeschlüsselt. Es fällt auf, dass besonders die Reinigungskosten und die unregelmäßigen Instandsetzungskosten einen großen Einfluss auf die Höhe der anfallenden Kosten haben. Wobei bei den Reinigungskosten anzumerken ist, dass ein großer Anteil auf die „Sowieso-Kosten“ zurückzuführen ist. Im Bereich der Instandhaltungskosten, hat man einen Einfluss von ca. 10 % auf die anfallenden Kosten. Diese Gebäude sind nicht speziell auf eine lange Lebensdauer der Komponenten hin optimiert worden, wodurch sich in diesem Bereich ein großes Optimierungspotential im Planungsprozess ergibt.

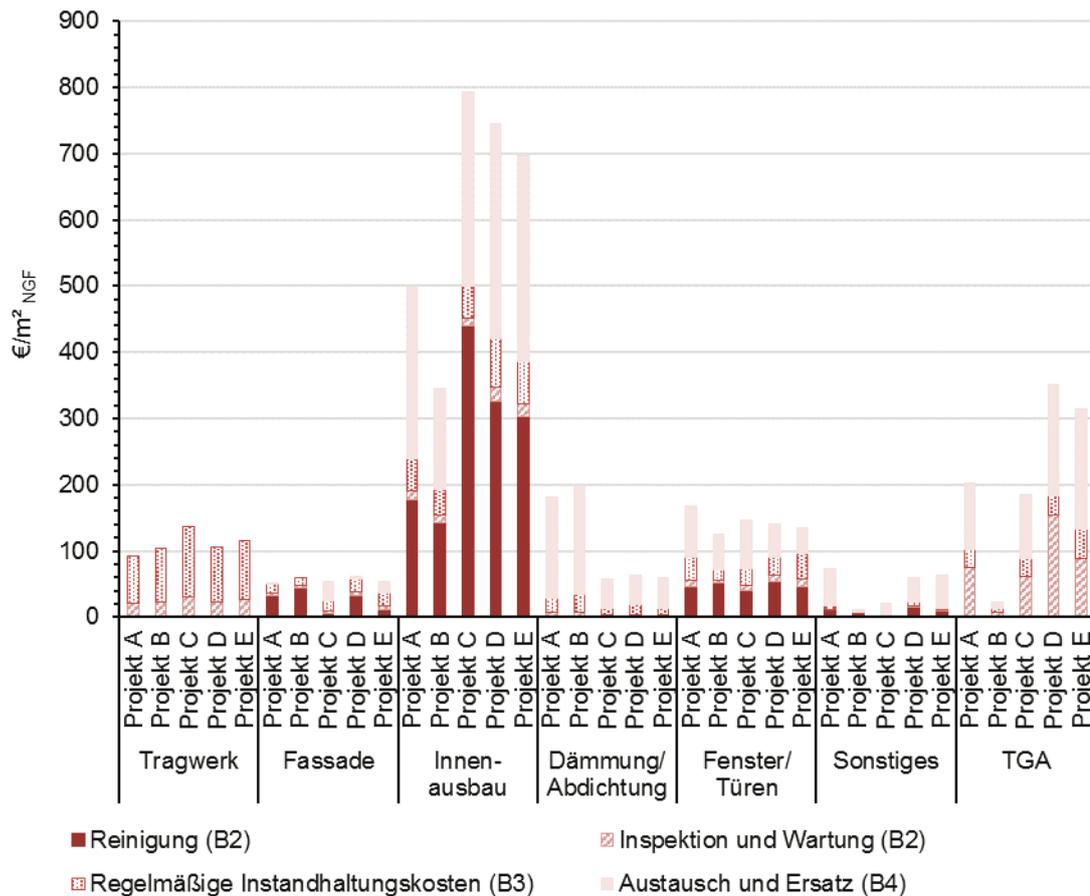


Abbildung 5-16: Verteilung der LCC im Bereich der Nutzungsphase (eigene Darstellung)

### 5.2.3 Abschätzung der Rückbaukosten

Die Berechnungsmethodik nach BNB sieht die Erfassung und Auswertung der Rückbaukosten im Rahmen der Lebenszykluskostenbetrachtung nicht vor. Jedoch wird die Kreislaufwirtschaft und die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in der Gesellschaft immer mehr diskutiert. Das Umweltbundesamt thematisiert bei dem Thema besonders drei Punkte:

- Vermeidung von Bau- und Abbruchabfällen
- Möglichkeit zum Recycling von nicht vermeidbaren Bau- und Abbruchabfällen
- Die Beseitigung unumgänglicher Abfälle sollte vermieden werden

Dieses Thema wurde des Weiteren im Kreislaufwirtschaftsgesetz, den europäischen Abfallrichtlinien und dem deutschen Ressourceneffizienzprogramm verankert und um Ziele ergänzt, die es einzuhalten gilt (BMU, 2017).

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts soll ein erster Ausblick auf die Kosten gegeben werden, die durch den Bau und den Betrieb von Gebäuden, am Lebensende durch den Abbruch und damit verbundene Abfallbehandlung anfallen. Legep hat, um die gesellschaftliche Tendenz abbilden zu können, Rückbaukosten erhoben. Diese Kosten wurden mit Herstellern und Experten diskutiert und in die Programmoberflächen integriert (König, o.J.). Im Rahmen der Projektauswertung, wurden die Rückbaukosten, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, masse- und bauteilspezifisch erhoben, je nachdem ob das Bauteil manuell rückgebaut werden kann oder abgerissen wird. Eine

Erhebung der anfallenden Entsorgungskosten wurde jedoch erst im Rahmen des erstellten Bauteilkatalogs erhoben und wurde in den Kapiteln 6 und 7 berücksichtigt.

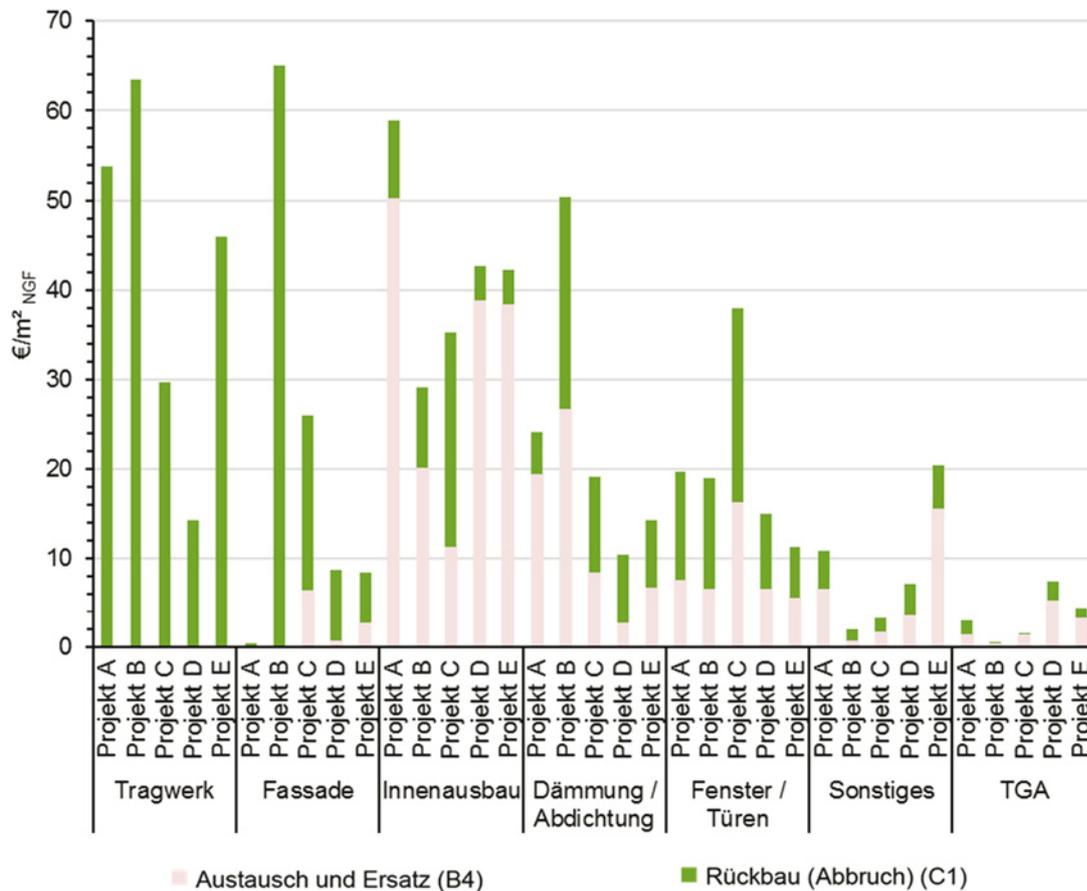


Abbildung 5-17: Auswertung der Rückbaukosten für die Instandhaltung und für den Abbruch am Lebensende (eigene Darstellung)

Die Grafik zeigt die Kosten, die im Laufe des Lebenszyklus für den Rückbau (Abbruch) des Gebäudes anfallen. Dabei wird deutlich, dass aufgrund der Instandhaltung im Bereich des Innenausbaus, der Dachabdichtung und der Fenster und Türen hohe Kosten anfallen. Aufgrund der starken Schwankung lässt sich für diese Kostenkennwerte keine eindeutige Tendenz ableiten. Um eine detaillierte Aussage über die Kosten für den Rückbau treffen zu können, müssen weitere Forschungen und Datenanalysen durchgeführt werden.

### 5.2.4 Ergebnisübersicht Betriebsenergie

Die Betriebsenergie eines Gebäudes, macht einen weiteren wesentlichen Kostenanteil aus. Da die Betriebsenergie nicht einer funktionalen Kategorie zugeordnet werden kann, wird der Einfluss des betrieblichen Energieeinsatzes B6 separat in diesem Kapitel diskutiert.

Die nachfolgende Auswertung zeigt, dass die Betriebsenergie 15 bis 30 % der Lebenszykluskosten ausmachen. Diese Kosten setzen sich aus den Kosten für die Konditionierung und die Beleuchtung zusammen. Der Energieeinsatz, der durch die Nutzung (Nutzerstrom) verbraucht wird, ist in dieser Zusammenfassung nicht enthalten.

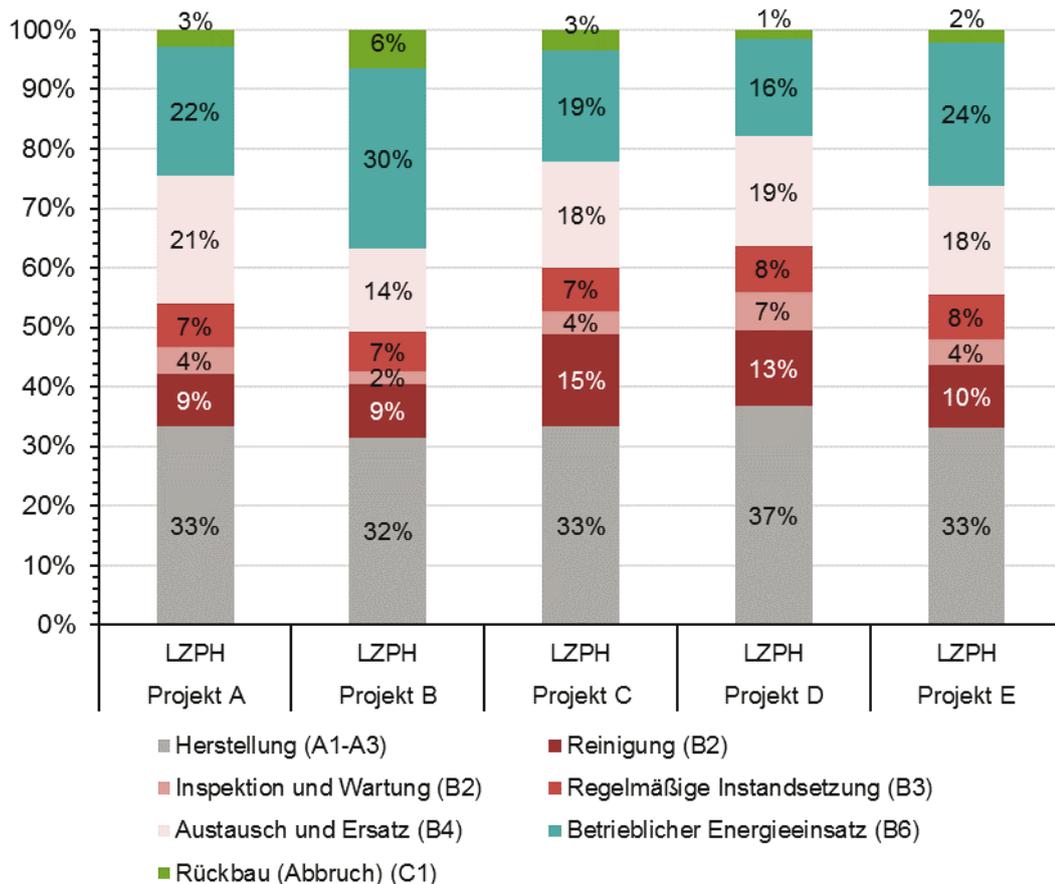


Abbildung 5-18: Prozentuale Auswertung der Kosten in den einzelnen Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

### 5.2.5 Wesentliche Merkmale und Erkenntnisse der LCC-Betrachtung

Die Auswertung der Lebenszykluskosten hat ergeben, dass je nach funktionaler Kategorie unterschiedliche Lebenszyklusphasen relevant werden. Die Eigenschaften und Stellschrauben der verschiedenen Gebäudekomponenten bzw. Energiebedarfe werden nachfolgend zusammengefasst.

#### 5.2.5.1 Tragwerk

Für das Tragwerk sind besonders die Investitionskosten relevant. Diese sind jedoch Sowieso-Kosten und lassen sich nur durch ein effizienteres statisches System optimieren, indem z.B. Baumaterial auf ein notwendiges Mindestmaß reduziert wird oder ein kostengünstigeres Material gewählt wird. Diese Veränderung hat jedoch einen weitreichenden Einfluss auf die Gestaltung des gesamten Gebäudes und kann nur in sehr frühen Planungsphasen untersucht werden. Die hier untersuchten Stahlbetongebäude weisen bei den Investitionskosten maximale Abweichungen von 5 % auf, weshalb davon ausgegangen wird, dass das statische Massivbaukonzept soweit optimiert geplant wurde. Den größten Einfluss hat man folglich, wenn man die Rückbau-

kosten betrachtet. Dabei kann eine Stahlbetonskelettbauweise positiv bewertet werden, welche die günstigsten Rückbaukosten bei den vorhandenen Stahlbetonkonstruktionen zu besitzen scheint.

#### 5.2.5.2 Fassade

Bezogen auf die Fassaden sind die Einflussfaktoren auf die Lebenszykluskosten sehr unterschiedlich. Zudem gewichten sich die identifizierten Einflussgrößen je Gebäu-  
degröße und -geometrie anders. Grundsätzlich konnten folgende Einflussfaktoren identifiziert werden:

- Fassadenmaterial (→ Umfang des Reinigungs- und Instandhaltungsaufwandes)
  - Keine bis hohe Reinigungskosten
  - Kein Austausch oder mehrere Austausche während der Lebensdauer
- Fassadenfläche (→ prozentualer Anteil der Fassadenfläche zur NGF)
  - Hohes A/V-Verhältnis bedingt größeren Einfluss
- Konstruktionsart (→ Art und Weise des Rückbaus)
  - Wenn die Fassade als Elementfassade geplant wird, kann ein selektiver Rückbau eingeplant werden; das verursacht zwar zunächst höhere Kosten, jedoch können die Baustoffe einem hochwertigen Recycling zugeführt werden. Dies würde dem Kreislaufgedanken zur Schonung der natürlichen Ressourcen entsprechen.

Gegebenenfalls ergeben sich aus dem derzeit laufenden Forschungsprojekt „ergebnisorientierte Reinigung“ (SWD-10.08.18.7-17.63, Laufzeit bis Juli 2019) der Beuth Hochschule Technik für Berlin weitere Empfehlungen zu einer Optimierung der Reinigungsprozesse in Gebäuden. Im Rahmen des vorliegenden Projektes können lediglich material- und projektbezogene Empfehlungen gemacht werden.

#### 5.2.5.3 Innenausbau

Der Innenausbau weist außer im Projekt B den größten Kostenanteil auf. Dies kann durch die höheren Austauschzyklen der Materialien und durch die Reinigungskosten der Oberflächen erklärt werden. Für diese funktionale Kategorie kann festgehalten werden, dass die Lebenszykluskosten rein für die Erneuerung der Materialien und für die Wartung und Instandhaltung nochmal zusätzlich zu den Investitionskosten um 100 % bis 160 % steigen. Hinzu kommen Reinigungskosten, die je nach Bauweise und Nutzung, bezogen auf die Investitionskosten in der Nutzungsphase 75 % bis 100 % ausmachen.

#### 5.2.5.4 Dämmung und Abdichtung

Im Bereich der funktionalen Kategorie Dämmung und Abdichtung“ konnten keine eindeutigen Optimierungspotentiale bzw. vermeidbaren Kostentreiber identifiziert werden.

#### *5.2.5.5 Fenster und Türen (innen und außen)*

Zusätzlich zu den Investitionskosten fallen für Fenster und Türen im Lebenszyklus nochmals 25 bis 70 % Reinigungskosten an. Diese große Spannweite entsteht aufgrund der Geometrie und der Erreichbarkeit der zu reinigenden Fensterflächen der Fassade und der Glasflächenanteile in den Innenräumen. Die Reinigungskosten der Innenwände und bzw. -verglasungen können allerdings mit den Instandhaltungskosten der funktionalen Kategorie des Innenausbau verglichen werden. Denn nichttragende, opake Innenwände besitzen in der Regel höhere Austauschzyklen und verursachen dadurch meist höhere Kosten als die regelmäßige Reinigung transparenter und langlebiger Innenwandflächen.

#### *5.2.5.6 Sonstiges*

Die Kategorie „Sonstiges“ weist durch die Raffstore-Verschattung einen relativ hohen Kostenanteil auf. Diese können jedoch den „Sowieso-Kosten“ zugeordnet werden. Deswegen kann dieser Kennwert in der Analyse in frühen Planungsphasen vernachlässigt werden.

#### *5.2.5.7 Technische Gebäudeausrüstung*

Die detaillierte Bilanzierung der technischen Gebäudeausrüstung ist, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, auf die Energieerzeuger beschränkt. Leitungen werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. In dieser Studie hat die technische Gebäudeausrüstung einen Anteil von 6 % an den Errichtungskosten, 0 % an den Reinigungskosten und 75 % an den Wartungs- und Instandhaltungskosten. Untersucht man andere Literaturquellen, besitzt die technische Gebäudeausrüstung gemessen am Gesamtgebäude (KG 300 + 400) ca. 40 % bezogen auf die Errichtungskosten, ca. 70 % an den Wartungs- und Instandhaltungskosten und ca. 6 % an den Reinigungskosten (Rothermund, 2015).

Durch den sehr geringen Ansatz der Investitionskosten kommt es zu einer Verschiebung der Bedeutung dieser funktionalen Kategorie. Die Kosten lassen sich anhand von allgemeinen Kostenkennwerten nur schwer abbilden. In diesem Bereich ist ein weiterer Forschungsaufwand erforderlich, um diese funktionale Kategorie besser abbilden zu können (siehe Kapitel 8.3).

#### *5.2.5.8 Betrieblicher Energieeinsatz*

Der betriebliche Energieeinsatz hat in dieser Studie einen Einfluss von ca. 20 %. Dies resultiert aus den Kosten für die Energieträger. Diese Kosten können stark durch die gewählte gebäudetechnische Anlage und die Qualität der Gebäudehülle beeinflusst werden und sollten in frühen Phasen untersucht werden. Der Kostenanteil des Gebäudebetriebs wird jedoch in der Nutzungsphase durch die Kosten für den Nutzerstrom deutlich erhöht, der bei diesen Auswertungen nicht berücksichtigt wird, da er durch das Gebäude selbst nicht beeinflusst wird. Als grober Abschätzungswert kann die

im Leitfaden nachhaltigkeitsorientierte Architekturwettbewerbe (Hamburg, 2011) erwähnte Größe von 17 kWh pro m<sup>2</sup> BGF a (beheizt) und Jahr verwendet werden. Dieser Stromverbrauch würde nach den im Projekt verwendeten Kennwerten 3,40 € kosten (s. Tabelle 3-2) und 9,83 kg CO<sub>2</sub>-Äq. verursachen (Ökobaudat Datensatz: Strom für Gebäudebetrieb 2017) und damit die Gesamtkosten für den Energiebedarf um ca. 20 bis 25% erhöhen.

### 5.3 Eco-Costs und externe Kosten der Projekte

Als eine mögliche Zusammenfassung der LCA-Indikatoren werden auf der Basis der Ökobilanz-Ergebnisse mit Hilfe von Tabelle 2-3 Eco-Costs und externe Kosten der Projekte errechnet. Die in dem Eco-Costs enthaltene CO<sub>2</sub>-Korrektur wird vernachlässigt, da die Projekte nur einen geringen Holzanteil aufweisen. Die Ergebnisse werden abschließend in Bezug zu den Lebenszykluskosten gesetzt.

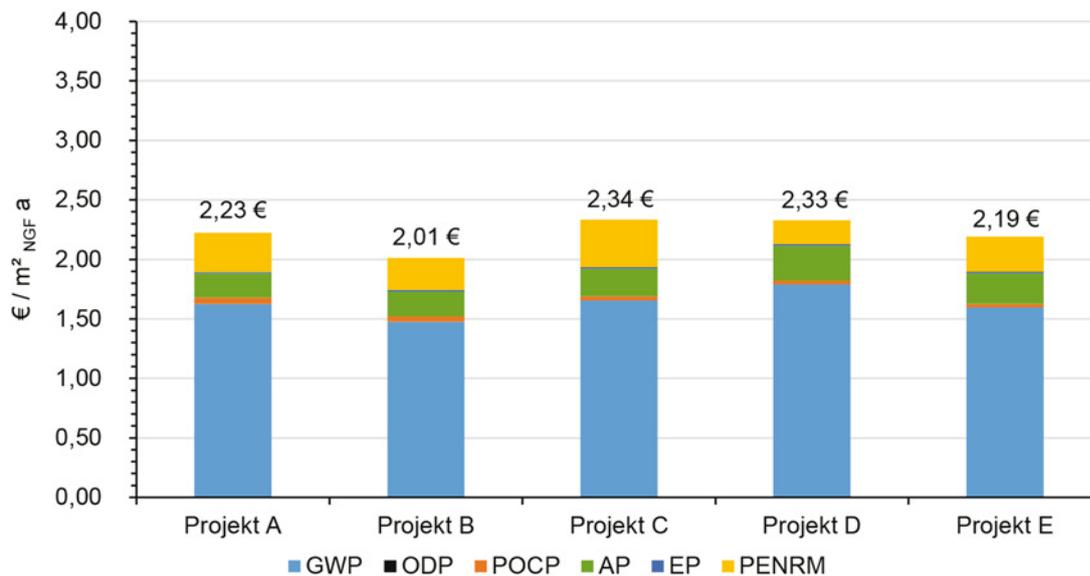


Abbildung 5-19: Eco-Costs der KG 300 pro m<sup>2</sup>NGF und Jahr (eigene Darstellung)

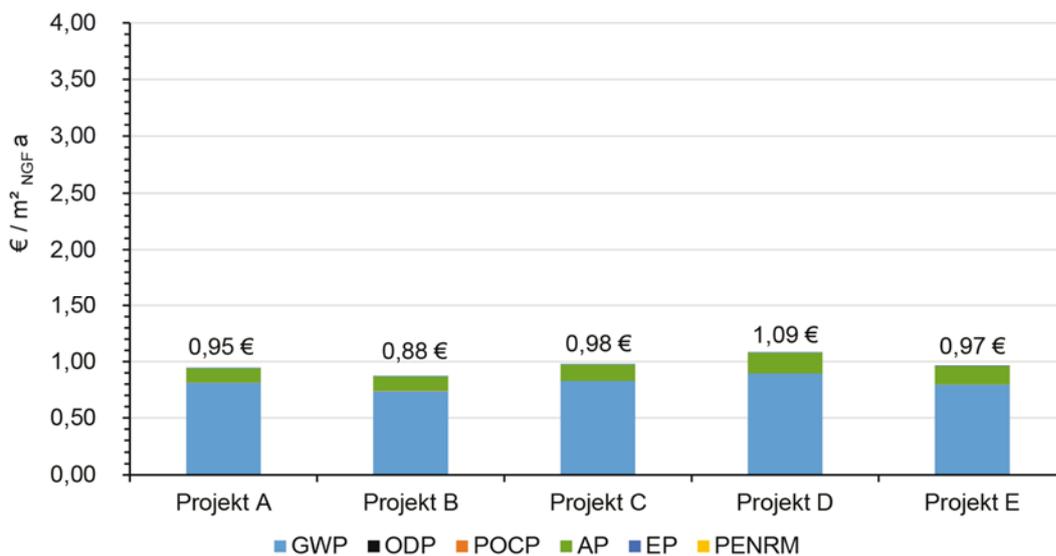


Abbildung 5-20: Externe Kosten der KG 300 pro m<sup>2</sup>NGF und Jahr (eigene Darstellung)

Die Berechnungen der Eco-Costs und der externen Kosten zeigen eine eindeutige Dominanz des Treibhauspotentials. Bei den Eco-Costs zeigt sich in zweiter Linie der Ressourcenindikator PENRM, der in den externen Kosten nicht bewertet wird. Des Weiteren ist das AP ein sichtbarer Indikator. Trotz der für Eco-Costs und externe Kosten sehr unterschiedlichen Bewertung der Indikatoren ODP, POCP und EP tragen diese kaum zu den Gesamtwerten bei. Dies unterstreicht die Richtigkeit der Auswahl der für das vorliegende Projekt verwendeten Indikatoren GWP, PENRT und AP.

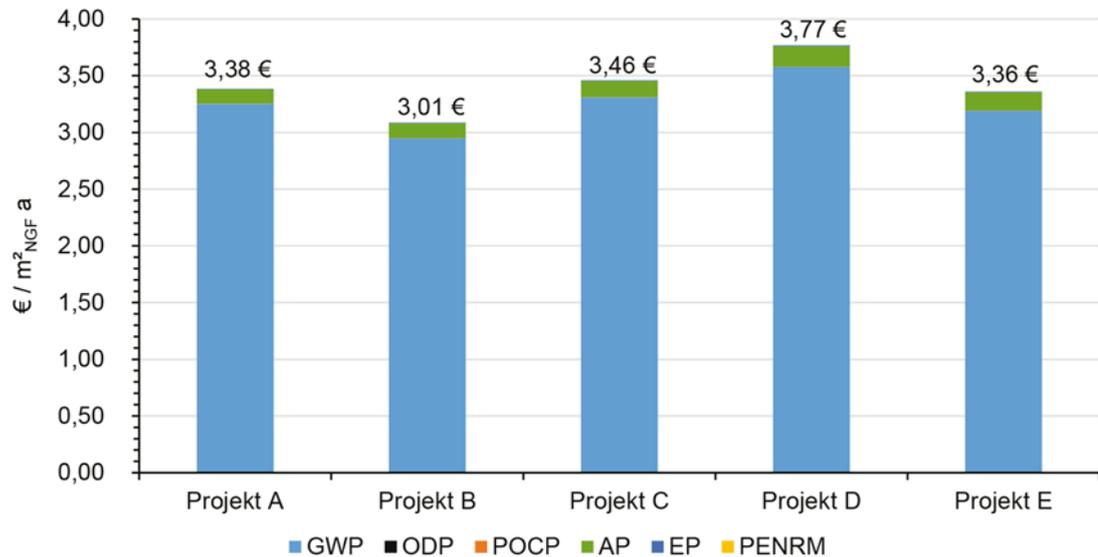


Abbildung 5-21: Externe Kosten der KG 300 pro m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> und Jahr, gerechnet mit dem Maximalwert für von 0,28 € pro kg CO<sub>2</sub>-Äq. (eigene Darstellung)

Da das GWP gerade bei den externen Kosten die entscheidende Rolle spielt, wird die Bepreisung des Treibhauspotentials gemäß (BMVBS, 2010) zusätzlich mit dem dort angegebenen Maximalpreis von 0,28 € pro kg CO<sub>2</sub>-Äq. berechnet. (Abbildung 5-21). Wie zu erwarten, erhöht dies die externen Kosten entscheidend, so dass sie höher liegen als die Eco-Costs. Die Einordnung der Projekte nach niedrigsten/höchsten externen Kosten verschiebt sich durch die höhere Bewertung des Treibhauspotentials insofern, als die sehr nahe aneinander liegenden Projekte A und E sich verschieben (2. bzw. 3. Rang), so dass die Reihenfolge sich der angleicht, die durch die Eco-Costs berechnet wurde.

Der Vergleich zwischen Eco-Costs und externen Kosten verursacht darüber hinaus eine Verschiebung zwischen den Projekten C und D. Grund hierfür sind die höheren PENRM-Werte des Projektes C. Da die Eco-Costs den Ressourcenindikator PENRM beinhalten, die Tendenz der Ergebnisse aber mit den externen Kosten übereinstimmt, werden sie für weitere Vergleichsrechnungen im vorliegenden Projekt verwendet.

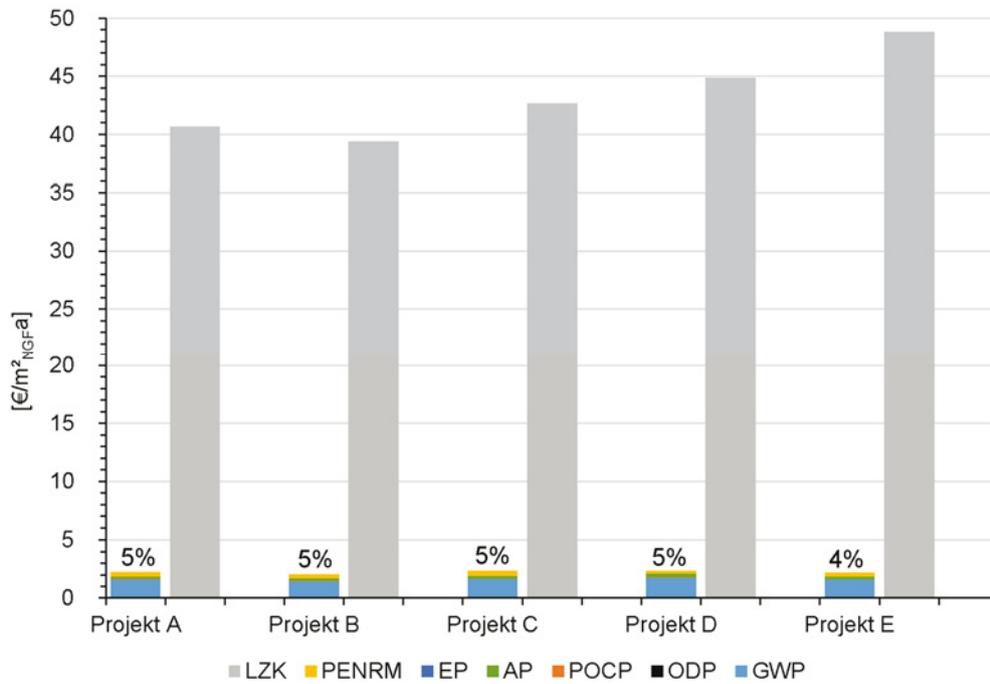


Abbildung 5-22: Eco-Costs der KG 300 im Vergleich zu den Lebenszykluskosten der KG 300 pro m<sup>2</sup>NGF und Jahr (eigene Darstellung)

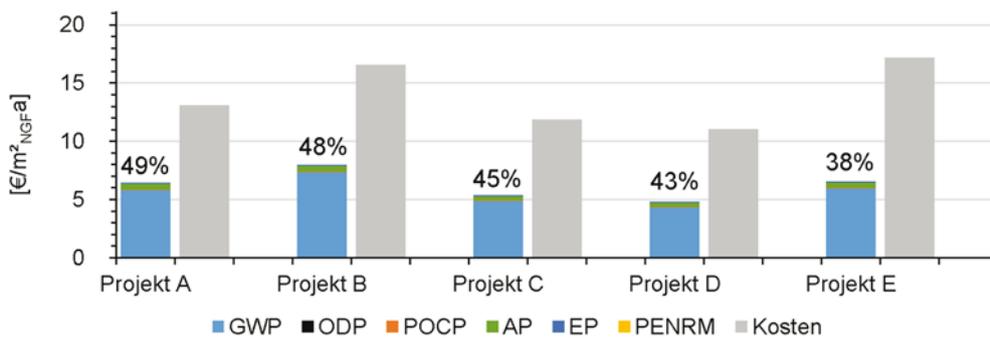


Abbildung 5-23: Eco-Costs Betrieb im Vergleich zu den Betriebskosten pro m<sup>2</sup>NGF und Jahr (eigene Darstellung)

Die Höhe der Eco-Costs der Konstruktion (KG 300) im Vergleich zu den Lebenszykluskosten der untersuchten Gebäudekonstruktionen ist vergleichbar gering. Müssen die Eco-Costs bezahlt werden, würden sie nur 4 % bis 5 % zu den Gebäudekosten hinzufügen (

Abbildung 5-22). Dies könnte zu der Schlussfolgerung führen, dass die Umweltwirkungen der Gebäudesubstanz keine signifikante Größe darstellen, eine Aussage, die besonders vor dem Hintergrund des insgesamt großen Energie- und Ressourcenbedarfs der Baubranche aus ökologischer Sicht falsch wäre. Umgekehrt lässt sich aber die Aussage treffen, dass die Mehrkosten für eine Vermeidung von Umweltschäden im Vergleich zu den Lebenszykluskosten der Konstruktion gering sind, so dass es keinen Grund geben sollte, umweltschädigende Gebäude zu bauen.

Anders stellt sich das Bild für die Betriebskosten (Phase B6) dar. Hier bewegen sich die Eco-Costs zwischen 38 % und 49 % (Abbildung 5-23). Dabei zeigt sich die Parallele zwischen LCA- und LCC- Berechnung: Die Energieversorgung verursacht einen Anteil von 66 % bis 80 % des GWP (Kap.5.1.3) und von 62 % bis 76 % der Eco-Costs, dagegen nur 16 % bis 30 % der Lebenszykluskosten (Kap. 5.2.4).

## 6 Detailuntersuchungen und Variantenstudien

Ergänzend zu der Analyse der Beispielprojekte unter Standardbedingungen werden anschließend weitere Detailuntersuchungen und Variantenstudien durchgeführt. So wird der Einfluss verschiedener Lebens- und Nutzungsdauern geprüft, eine detaillierte LCA der Kostengruppe 400 durchgeführt bzw. Energieversorgungsszenarien diskutiert. Die Variantenstudien münden zudem in einer Gegenüberstellung von Bauteilvarianten, um nicht nur gebäudebezogene, sondern auch bauteilbezogene Ergebniseinflüsse zu visualisieren.

### 6.1 Differenzbetrachtung Lebensdauer Gesamtgebäude Projekt A

Die definierte Lebensdauer eines Gebäudes, die nach BNB standardmäßig mit 50 Jahren angenommen wird, und die Austauschzyklen einzelner Baukomponenten beeinflussen neben der ökonomischen auch die ökologische Performance des Bauwerks.

Um zu klären, inwiefern spätere Nutzungsdauern in frühen Planungsphasen berücksichtigt werden sollten, werden am Beispiel des Projektes A vier verschiedene Nutzungsszenarios angenommen und berechnet. Da sich die Tendenzen beim GWP, PENRT und AP relativ ähnlich verhalten (vgl. Kapitel 5.1.2), werden die Ergebnisse stellvertretend für alle drei Indikatoren mit Hilfe des GWP dargestellt. Eine vergleichende Betrachtung von LCA und LCC erfolgt in Kapitel 6.2.

Folgende Szenarien werden neben der Standardbilanzierung (Gebäudenutzungsdauer: 50 a) untersucht:

- „Lebensdauer 80 a“: Das Tragwerk erhält eine Lebensdauer von 80 Jahren und wird während dieser Zeit nicht ausgetauscht bzw. ersetzt. Alle anderen Baukomponenten werden nach der Standardlebensdauer ausgetauscht.
- „Lebensdauer 30 a“: Das Gebäude wird bereits nach 30 Jahren vollständig abgerissen.
- „Lebensdauer 50 a, Innenausbau 30 a“: Das Gebäude wird mit der Standardnutzungsdauer von 50 Jahren bilanziert. Gleichzeitig wird angenommen, dass auf Grund sich ändernder Nutzungsanforderungen (z.B. Mieterwechsel) der Innenausbau (KG 325, 336, 342, 345, 346, 352, 353, 364) und der Sonnenschutz (KG 338) spätestens nach 30 Jahren komplett ersetzt werden (Lebensdauer  $\leq$  30 a).

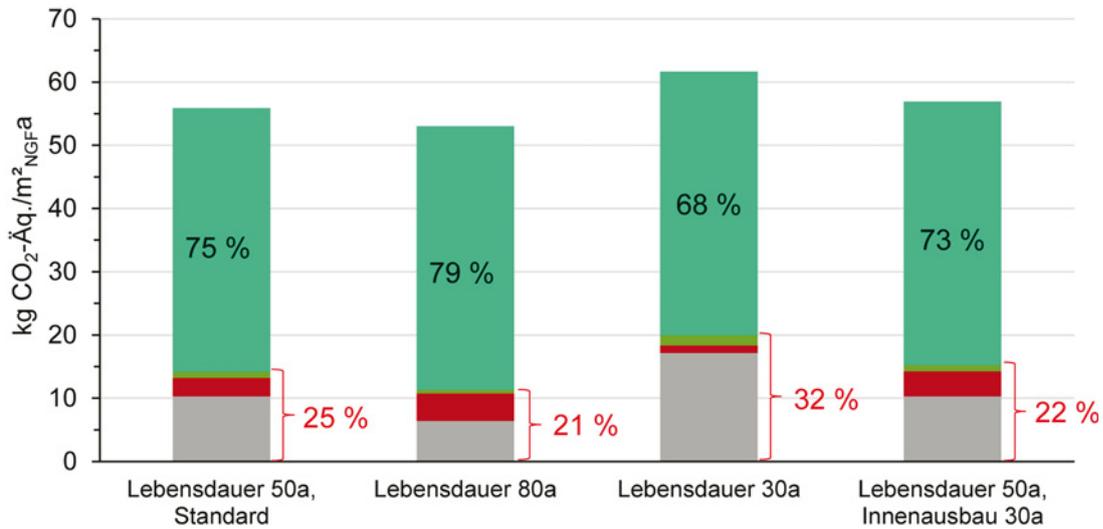
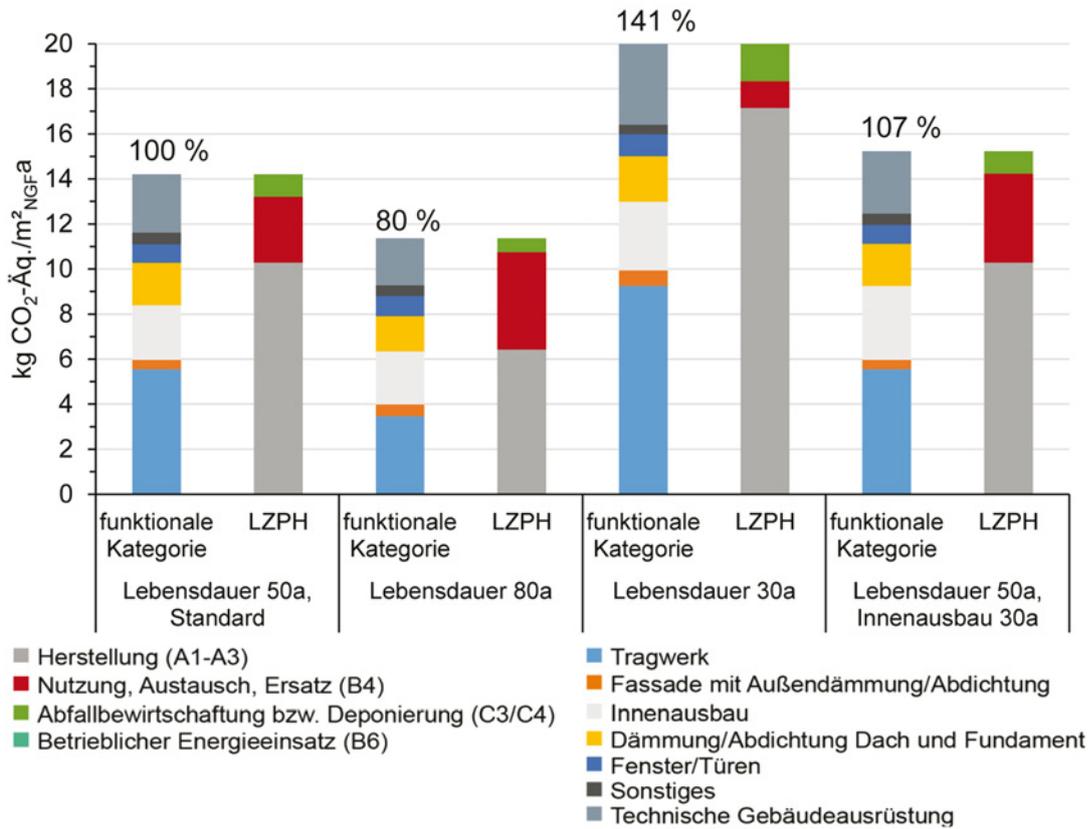


Abbildung 6-1: Einfluss der Nutzungsdauer des Gebäudes bzw. der Austauschzyklen – kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub> des Projektes A (eigene Darstellung)

Abbildung 6-1 zeigt die Berechnungsergebnisse der einzelnen Szenarien. Es wird deutlich, dass durch eine längere Nutzungsdauer des Gebäudes (80 Jahre) das jährliche GWP der KG 300 und 400 um 20 % reduziert werden kann. Demgegenüber steigt es um 41 % an, wenn das Gebäude schon nach 30 Jahren rückgebaut wird.

Ist innerhalb der 50 Jahre Lebensdauer eine Kernsanierung angedacht – z.B. auf Grund eines Mieterwechsels – und wählt man zu Beginn der Planungsphase eine flexible Raumanordnung, so dass nur der Innenausbau eine Kernsanierung erfährt, ist die Steigerung des jährlichen GWP relativ moderat (+ 7 %).

Unter Berücksichtigung des konstant bleibenden jährlichen betrieblichen Energieeinsatzes, ist das Optimierungspotential allerdings nach wie vor gering. Insgesamt kann das jährlich bezogene GWP der Gebäudekomponenten selbst nur um max. 4 % (Lebensdauer 80 Jahre) reduziert werden bzw. steigert es sich um max. 7 % (Lebensdauer 30 Jahre). Trotzdem sollten die spezifischen prozentualen Einsparungen nicht unterschätzt werden. Denn die 4 % stellen bei einem Lebenszyklus von 80 Jahren eine absolute Einsparung von 571 t CO<sub>2</sub>-Äq. dar. Wird das Gebäude spätestens nach 30 Jahren abgerissen, also theoretisch innerhalb von 80 Jahren 2,66-mal errichtet bzw. abgerissen, sind es sogar 1733 t CO<sub>2</sub>-Äq..

Der Einfluss des Tragwerks ist mit einem mittleren prozentualen Anteil von 38,1 % ± 4,6 % gleichbleibend hoch. Deshalb ist es unabhängig von der Nutzungsdauer wichtig, in frühen Planungsphasen auf die Ausführungsqualität des Tragwerks zu achten, wenn man eine ökologisch optimierte Lösung anstrebt. Der Innenausbau ist die zweitgrößte einflussnehmende funktionale Kategorie mit einem prozentualen Anteil von 15,2 % bis 21,6 %. Obwohl die betreffenden Oberflächenausführungen erst in späteren Planungsphasen festgelegt werden, sollte dennoch versucht werden, dass der Einfluss frühzeitig durch bestimmte Festlegungen (z.B. einfache und recyclingfähige Schichtenaufbauten) geringgehalten wird.

Der Anteil der Phase B4 am gesamten GWP nimmt ausgehend vom Standardszenario um 4 % bei einem Lebenszyklus von 80 Jahren zu, der Einfluss der Herstellungsphase nimmt gleichzeitig um 6 % ab. Deutlich ist der Einfluss der Herstellungsphase bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren (insgesamt 28 %), was im Wesentlichen auf das Tragwerk zurückgeführt werden kann.

Nichtsdestotrotz bleibt der wesentliche Treiber der betriebliche Energieeinsatz, der mindestens zwei Drittel des Treibhauspotentials über den Lebenszyklus ausmacht. Somit stellt dieser eine maßgebliche Stellschraube in frühen Planungsphasen dar. Beeinflussen kann man diese Phase durch die Festlegung auf einen hohen Energiestandard (→ geringerer Heiz- und ggf. Kühlenergiebedarf) oder die Wahl CO<sub>2</sub>-neutraler Energieträger.

## 6.2 Differenzbetrachtung Lebensdauer Teilbereich Projekt A

Wie im vorigen Kapitel bereits anhand des Projektes A dargestellt, ist die Wahl der strategischen Bauteile in frühen Planungsphasen und deren ökologische Qualität auch von der geplanten Nutzungsdauer des Gebäudes und der Gebäudekomponenten abhängig. Insbesondere gilt dies, wenn der betriebliche Energieeinsatz und die einhergehenden Umweltwirkungen während der Nutzungsdauer durch einen erhöhten energetischen Standard oder den Einsatz regenerativer Energien weiter verringert werden kann.

### 6.2.1 Wahl des Untersuchungsrahmens

Aus diesem Grund wird unabhängig vom betrieblichen Energieeinsatz nochmals eine Differenzbetrachtung durchgeführt. Je Gebäudelebensdauer werden die ökologischen (LCA) und ökonomischen (LCC) Auswirkungen der funktionalen Kategorien

bzw. Lebenszyklusphasen pro  $m^2_{NGF}$  und Jahr ermittelt und gegenübergestellt. Untersuchungsgegenstand stellt eine typische Büroräumenordnung dar, wie sie im Projekt A vorzufinden ist. Gemäß der vorhandenen Kostengruppen werden Standardregelaufbauten der projektübergreifend ermittelten Bauteilvarianten zugewiesen. Ergänzend zu Kapitel 6.1 sollen maßgebende Treiber bzw. Senker der ökologischen und ökonomischen Qualität identifiziert werden.

Der Grundriss der untersuchten Büroräume kann Abbildung 6-2 entnommen werden. Insgesamt besitzt die gewählte Gebäudefläche eine NGF von  $214,3 m^2$  und umschließt 8 Räume, wobei das Großraumbüro mit zwei halboffenen Nischenarbeitsplätzen ausgestattet ist.

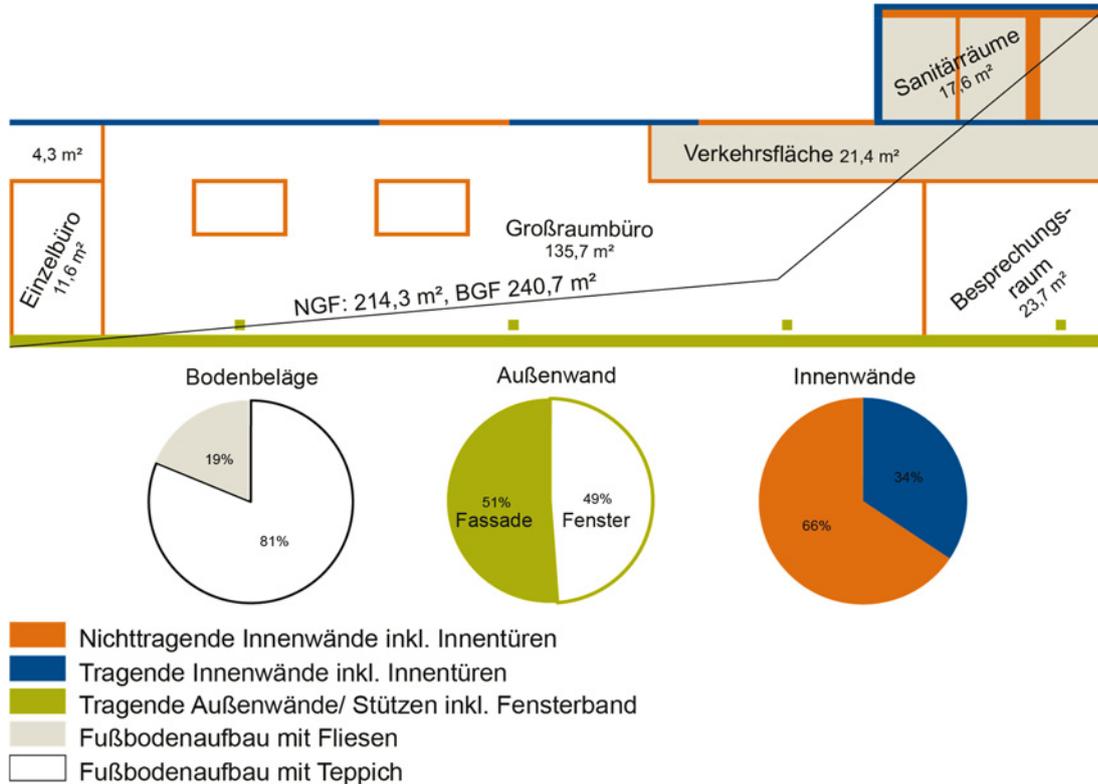


Abbildung 6-2: Grundrisschema der gewählten Typräume, inkl. der Flächenverteilungen (eigene Darstellung)

### 6.2.2 Wahl der Szenarien

Wie bereits in Kapitel 6.1 beschrieben, werden folgende Szenarien für die Differenzbetrachtung der Gebäudelebensdauer zu Grunde gelegt:

- „Lebensdauer 50 a, Standard“: Die Büronutzung und seine Baukonstruktionen erhalten eine Gesamtnutzungsdauer von 50 Jahren sowie die Standardaustauschzyklen nach BNB-Vorgaben (BMUB, 2017)
- „Lebensdauer 80 a“: Das Tragwerk erhält eine Lebensdauer von 80 Jahren und wird während dieser Zeit nicht ausgetauscht bzw. ersetzt. Alle anderen Baukomponenten werden nach deren Standardnutzungsdauer (BMUB, 2017) ausgetauscht.

- „Lebensdauer 30 a“: Das Gebäude wird bereits nach 30 Jahren vollständig abgerissen. Der Austausch erfolgt nur für Bauteilschichten, deren Nutzungsdauer weniger als 30 Jahre beträgt.
- „Lebensdauer 50 a, Innenausbau 30 a“: Das Gebäude wird mit der Standardnutzungsdauer von 50 Jahren bilanziert. Gleichzeitig wird angenommen, dass auf Grund sich ändernder Nutzungsanforderungen (z.B. Mieterwechsel) der Innenausbau (KG 325, 336, 342, 345, 346, 352, 353, 364) und der Sonnenschutz (KG 338) spätestens nach 30 Jahren komplett ersetzt werden (Lebensdauer  $\leq 30$  a).

### 6.2.3 Ergebnis LCA

Nachfolgende Diagramme stellen die LCA Ergebnisse der Differenzbetrachtung Gebäudelebensdauer für die Typräume des Projektes A dar. Entgegen Abbildung 6-1, Seite 64, in der die GWP-Differenzbetrachtung für das Gesamtgebäude abgebildet ist, stehen hier die Anteile der Baukonstruktion (KG 300) im Vordergrund. Die TGA sowie der betriebliche Energieeinsatz werden nicht betrachtet.

#### 6.2.3.1 Diskussion über Vergleichbarkeit der Gesamtprojekt- und Typraumergebnisse

Die spezifischen Ergebnisse des GWP ( $16,2 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2_{\text{NGFA}}$ ) für die KG 300 sind hier zwar höher (42 %) als beim Gesamtgebäude ( $11,6 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2_{\text{NGFA}}$ ), allerdings verhalten sich die prozentualen Unterschiede relativ ähnlich (vgl. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Vergleich der Projektergebnisse Gesamtgebäude und Typräume - Prozentuale Ab- und Zunahme des  $\text{kg CO}_2\text{-Äq./m}^2_{\text{NGFA}}$  gegenüber den jeweiligen Standardfällen (eigene Darstellung)

Gebäudelebensdauer	Gesamtgebäude	Typräume
Lebensdauer 50 a, Standard	100 %	100 %
Lebensdauer 80 a	80 %	86 %
Lebensdauer 30 a	141 %	133 %
Lebensdauer 50 a, Innenausbau 30 a	107 %	117 %

Der prozentuale Anteil des Tragwerks am Gesamtergebnis der KG 300 ist zwar insgesamt geringer (32 % zu 48 % beim Gesamtgebäude), jedoch stellt auch hier diese funktionale Kategorie den größten Anteil mit  $30,7 \pm 9,4$  % über die Varianten der Nutzungsdauern hinweg. Der Innenausbau besitzt hier nahezu den gleichen Einfluss wie beim Gesamtgebäude (20,9 %) mit einem Mittelwert von  $22,0 \pm 2,9$  %. Auch die Fenster nehmen einen ähnlichen Einfluss mit  $8,6 \pm 1,8$  %. Die funktionale Kategorie „Fassade“ nimmt je  $\text{m}^2_{\text{NGF}}$  einen erhöhten Einfluss (8,6 % statt 3,6 %) bei der Standardlebensdauer, was auf die Außenlage der Typräume und dem entsprechend höheren Flächenanteil zurückzuführen ist. Der Einfluss der „Dämmung/Abdichtung“ steigt um 8,9 % an, weil als oberer Raumabschluss nicht eine Geschosdecke, sondern eine Dachdecke angenommen wurde. Auf die Massen des Tragwerks hat diese Annahme keinen Einfluss, da die Dachdecke wie eine Geschosdecke dimensioniert ist.

Insgesamt stehen bei dieser Betrachtung jedoch nicht die detaillierten Einzelergebnisse im Fokus. Vielmehr ist es Ziel, die Tendenzen der Treiber und Senker der LCA

und LCC zu vergleichen, indem man die Gebäudenutzungsdauern verändert. Da die Massenverteilung über die Nutzungsvarianten konstant bleibt, können diese Tendenzen transparent dargestellt und die Erkenntnisse auch auf das Gesamtprojekt übertragen werden.

### 6.2.3.2 Diskussion der Ergebnisse

Vergleicht man nachfolgende Abbildungen sind die Vorteile einer längeren Nutzungsdauer der KG 300 deutlich erkennbar:

- Das jährlich bezogene GWP kann um 14 % reduziert werden, bzw. erhöht sich um bis zu 33 % (Abbildung 6-3)
- Die jährlich bezogene PENRT kann um 12 % reduziert werden, bzw. erhöht sich um bis zu 25 % (Abbildung 6-4)
- Das jährlich bezogene AP kann um 8 % reduziert werden, bzw. erhöht sich um bis zu 32 % (Abbildung 6-5)
- Die Phasen C3 und C4 nehmen an den Ergebnissen der PENRT und des AP nahezu keinen Einfluss (< 3 %).

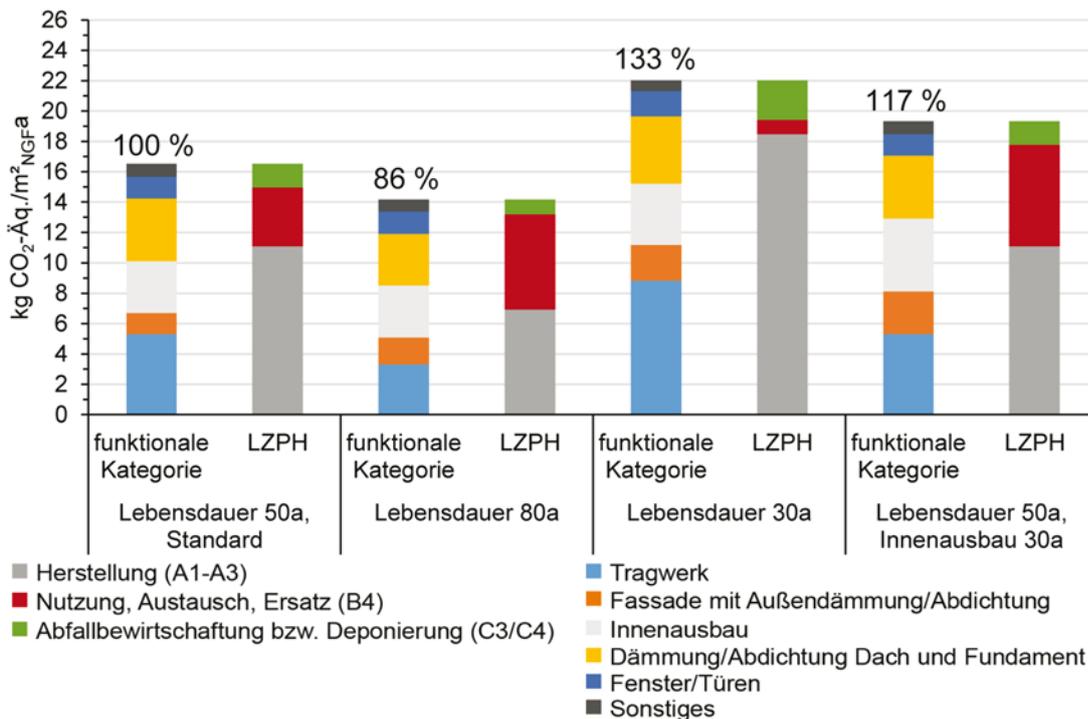


Abbildung 6-3: Differenzbetrachtung Gebäudelebensdauer GWP – kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>NGFA der gewählten Typräume (eigene Darstellung)

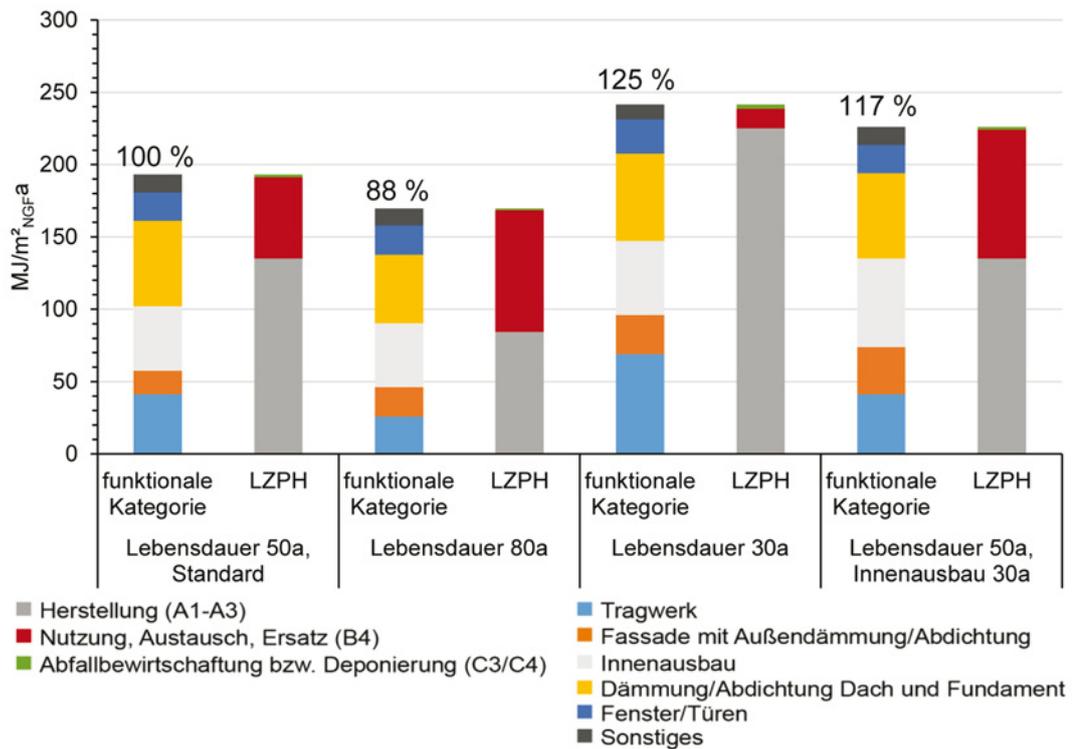


Abbildung 6-4: Differenzbetrachtung Gebäudelebensdauer PENRT – MJ/m²<sub>NGFA</sub> der gewählten Typ-räume (eigene Darstellung)

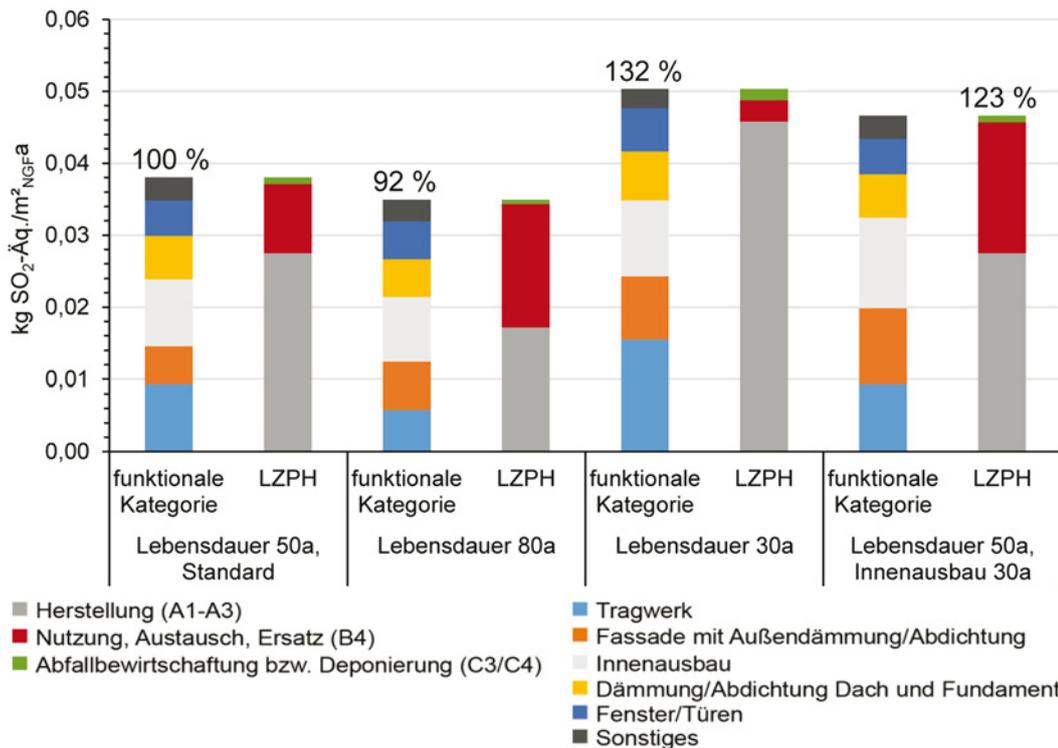


Abbildung 6-5: Differenzbetrachtung Gebäudelebensdauer AP – kg SO<sub>2</sub>-Äq./m²<sub>NGFA</sub> der gewählten Typ-räume (eigene Darstellung)

Der Innenausbau nimmt über alle Lebensdauern hinweg und in allen Umweltkategorien rund 18 bis 27 % Einfluss. Die funktionale Kategorie „Dämmung/Abdichtung“ trägt im Mittel zu 27 % am PENRT bei und ist ebenfalls gleichbleibend hoch. Der spezifische Energieverbrauch dieser Kategorie kann gegenüber der Standardlebensdauer

um 19 % verringert werden, wenn die Gebäudelebensdauer auf 80 Jahre erhöht wird (Standard 50a: 58,88 MJ/m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>; 80a: 47,44 MJ/m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>). Weiter kann der Einfluss dieser Kategorien nur reduziert werden, indem man ökologischere Baustoffe einsetzt oder neben einer längeren Gebäudelebensdauer auch längere Nutzungszyklen vorsieht.

Eine zusätzliche Sanierungsrate bei den Kategorien „Fenster“ und „Fassade“ erhöht zwar im Szenario „Lebensdauer 80a“ den PENRT um zusammen 4,71 MJ/m<sup>2</sup><sub>NGFA</sub>, allerdings könnte dieser ebenfalls durch längere Nutzungsdauern der betreffenden Bauteile weiter verringert werden.

Ist die Veränderung des Bauwerks auf Grund einer Nutzungsänderung oder eines Mieterwechsels trotzdem erforderlich, empfiehlt sich die Planung eines anpassungsfähigen Grundrisses: denn durch den Erhalt des Gebäudes können im Schnitt 6 bis 12 % der Umweltwirkungen bzw. des Energiebedarfs für die Baukonstruktion eingespart werden („Lebensdauer 30a“ ↔ „Lebensdauer 50a, Innenausbau 30a“).

#### 6.2.4 Ergebnis LCC

Anhand eines ausgewählten Gebäudeteils, der alle relevanten Nutzungen enthält, werden die Lebenszykluskosten entsprechend den in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Szenarien ermittelt. Dabei soll ausgewertet werden, welchen Einfluss die Wahl des Betrachtungszeitraums und mögliche Mieterwechsel auf die Berechnung der Lebenszykluskosten haben. Da es sich hierbei ausschließlich um die Betrachtung eines Teilbereichs des Gebäudes handelt, wird die Betrachtung von B6 ausgeschlossen und auch die Gebäudetechnik KG 400 nicht mit in die Untersuchung mit einbezogen.

Die Lebenszykluskosten für den Typenraum wurden anhand von Daten, die im Bauteilkatalog erhoben wurden, erstellt und um spezifische Kostenkennwerte ergänzt. Eine weitere Veränderung gegenüber der LCC-Auswertung im Kapitel 5.2 ist, dass die Kosten für die Entsorgung der Materialien (C3/C4) mit aufgenommen wurden. Diese beziehen sich auf reale Kostenkennwerte, die WEKA zur Verfügung stellt (vgl. auch Kapitel 6.5.2.1) (König, o.J.).

##### *6.2.4.1 Diskussion über Vergleichbarkeit der Gesamtprojekt- und Typ- raumergebnisse*

Die gesamten LZK der Typräume liegen je m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> und Jahr 30 % über den LZK des Gesamtgebäudes. Diese Abweichung ist auf die Kosten für die funktionalen Kategorien „Fenster/Türen“ und „Sonstiges“ zurückzuführen. Einfluss nimmt der relativ große Fensterflächenanteil. Daraus bedingen sich auch die Mehrkosten für den Sonnenschutz, die in der funktionalen Kategorie „Sonstiges“ abgebildet werden. Die anderen funktionalen Kategorien stimmen weitestgehend mit den Parametern des Gesamtgebäudes überein.

Da bei dieser Betrachtung jedoch nicht die detaillierten Einzelergebnisse sondern vielmehr die von der Nutzungsdauer abhängigen Treiber und Senker der LCA und LCC im Vordergrund stehen, werden die Abweichungen als akzeptabel angesehen.

## 6.2.4.2 Diskussion der Ergebnisse

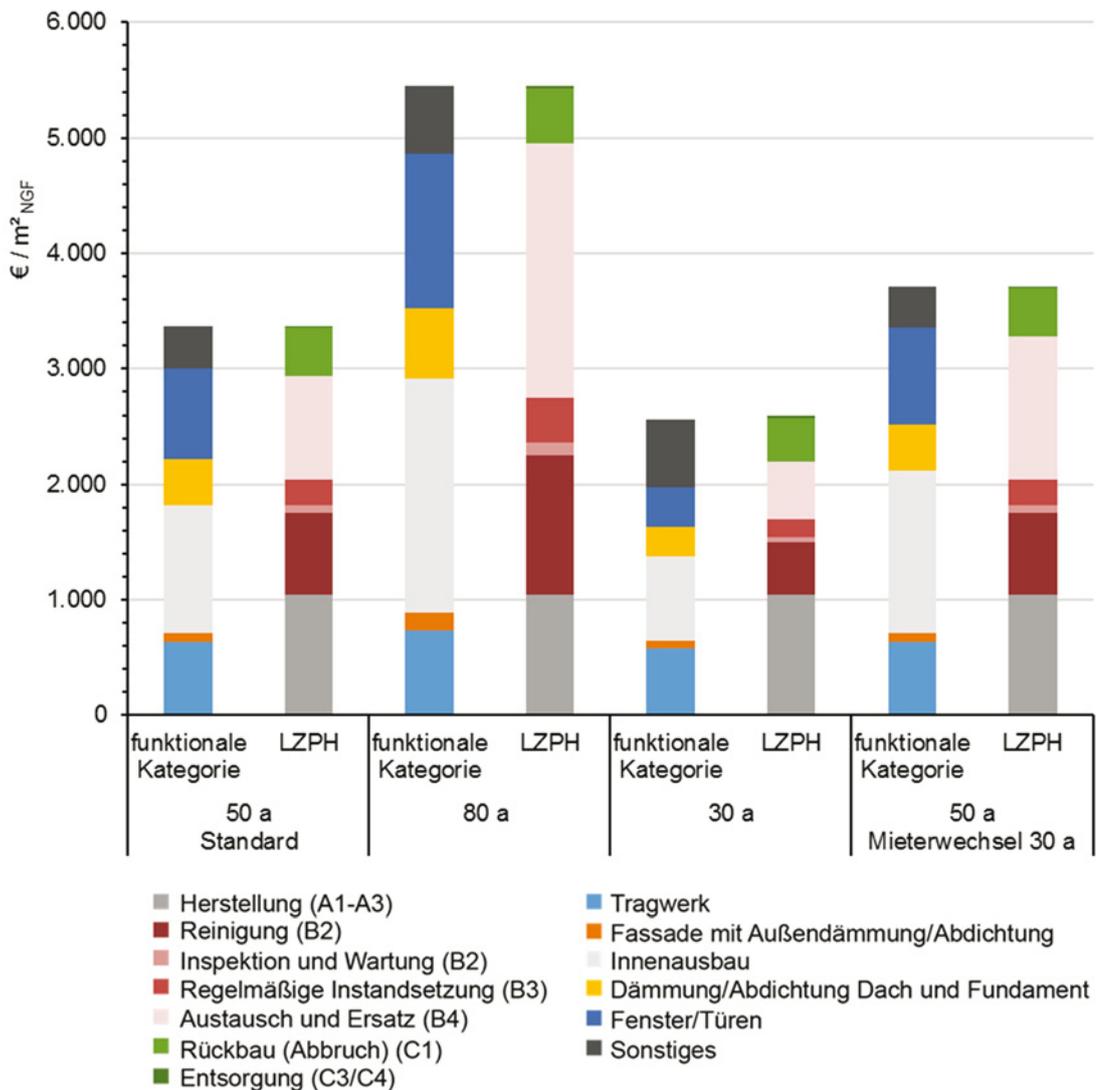


Abbildung 6-6: Auswertung der Auswirkungen von unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen von Gebäuden auf die jährlichen Lebenszykluskosten in den funktionalen Kategorien und den Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung)

Durch die Variation des Betrachtungszeitraums und der Austauschzyklen (nur in Szenario 4: Betrachtungszeitraum 50 a mit einem simulierten Mieterwechsel nach 30 a) verändern sich die Anteile der Nutzungskosten der Gebäudekonstruktion (vgl. Abbildung 6-6). Um die anfallenden Kosten beurteilen zu können, werden sie prozentual auf die Investitionskosten bezogen (siehe nachfolgende Tabelle).

Tabelle 6-2: Auswertung der Größe der Nutzungskosten bezogen auf die Investitionskosten (eigene Darstellung)

	Höhe der Nutzungskosten bezogen auf die Investitionskosten
Szenario 1: 50 a	181 %
Szenario 2: 80 a	373 %
Szenario 3: 30 a	110 %
Szenario 4: 50 a mit Mieterwechsel 30 a	214 %

Die Ermittlung ergibt, dass die Nutzungskosten einen vielfachen Anteil der Investitionskosten ausmachen. Außerdem kann man ablesen, dass ein Austausch des Innenausbaus vor Ablauf des Lebensendes eine Erhöhung der Nutzungskosten um 33 % verursacht.

Um den Einfluss des Betrachtungszeitraums noch weiter zu berücksichtigen, werden nachfolgend die Lebenszykluskosten auf den Betrachtungszeitraum bezogen. Abbildung 6-7 zeigt, dass die Lebenszykluskosten bezogen auf die jährliche Belastung bei einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren steigen. Ebenso werden durch den Mieterwechsel und den damit verbundenen vorzeitigen Austausch des Innenausbaus zusätzliche Kosten verursacht.

Die Lebenszykluskosten pro m<sup>2</sup> und Jahr bleiben fast unverändert für einen Betrachtungszeitraum von 50 bzw. 80 Jahren. Allerdings ergibt sich eine deutliche Verschiebung in den funktionalen Kategorien und in den Lebenszyklusphasen: der längere Betrachtungszeitraum senkt die jährliche finanzielle Belastung durch langlebige Bauteile wie das Tragwerk und führt zu einem Anstieg der LZK des Innenausbaus, bei dem Bauteile oft ausgetauscht werden. Parallel dazu werden die Phasen der Herstellung und Entsorgung bei längerem Betrachtungszeitraum weniger relevant, während die Nutzungsphase Austausch und Ersatz höhere jährliche Kosten verursacht.

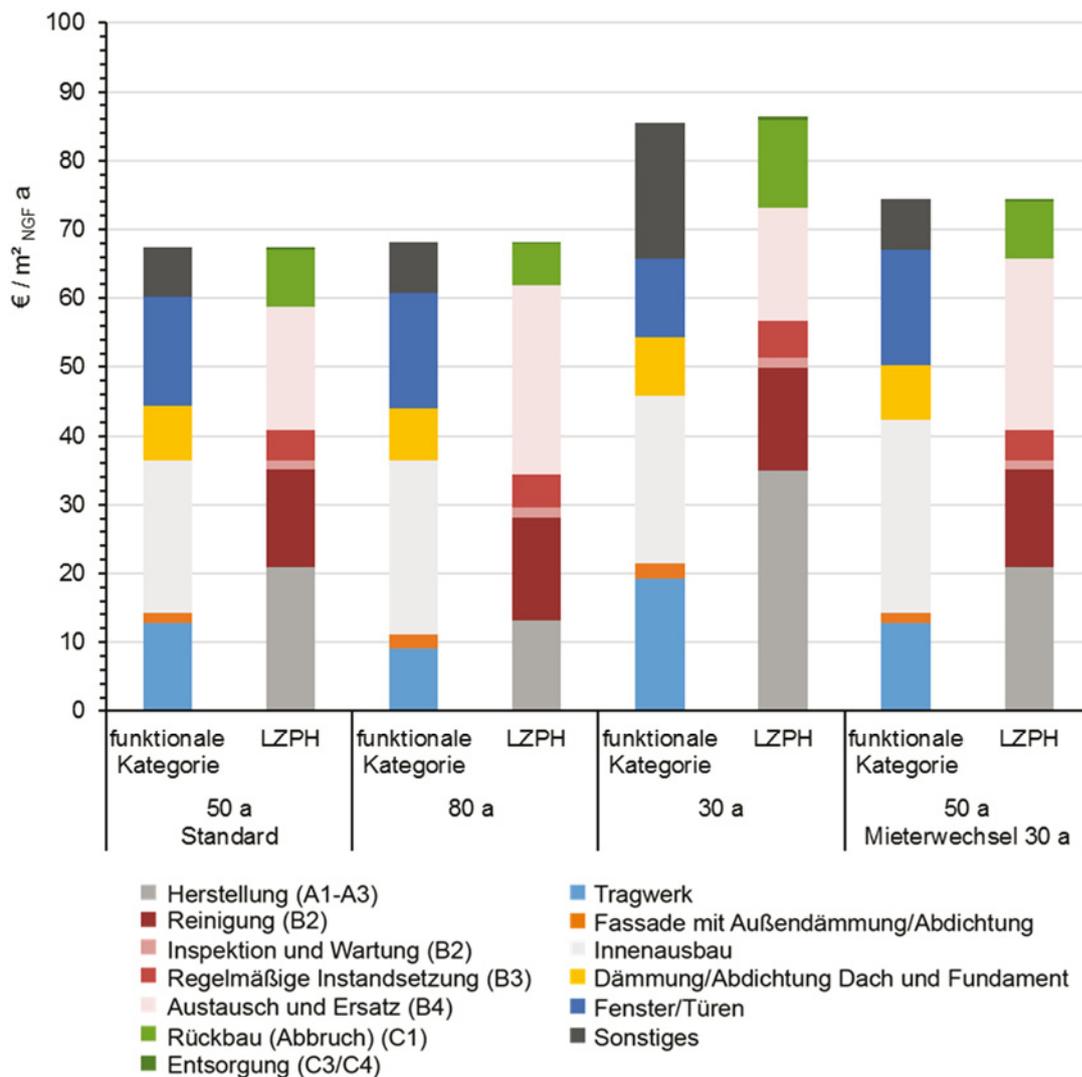


Abbildung 6-7: Auswertung der Auswirkungen von unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen von Gebäuden unter Berücksichtigung der jährlichen Kosten (eigene Darstellung)

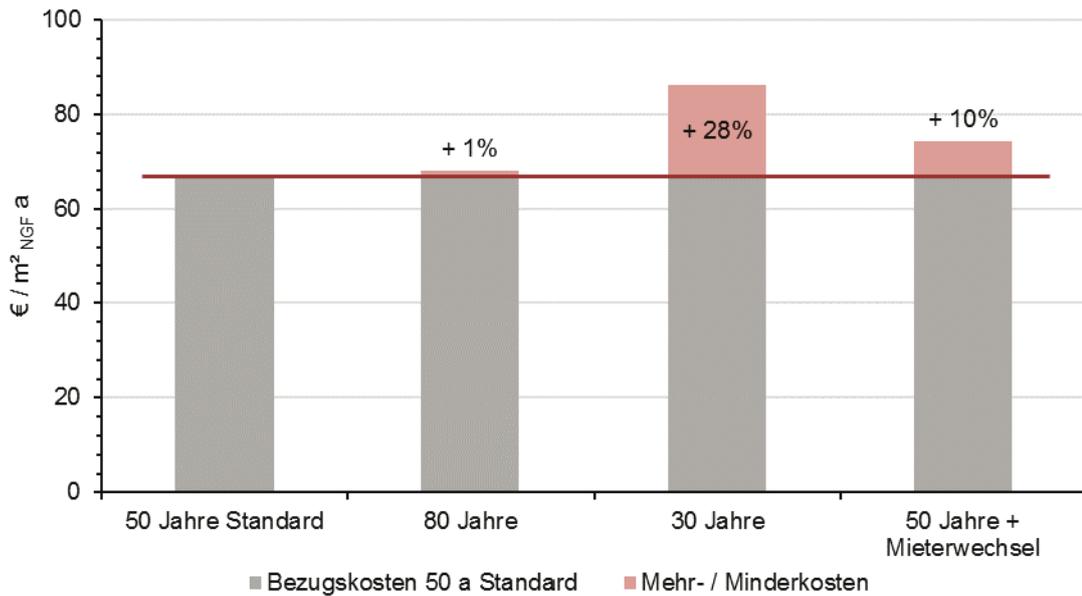


Abbildung 6-8: Abweichung der jährlichen Lebenszykluskosten bezogen auf die Standardberechnung mit dem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren

### 6.2.5 Wesentliche Erkenntnisse – Vergleich LCA und LCC

Stellvertretend für die Ökobilanzierung ist in Abbildung 6-9 das GWP (kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>NGFa) je funktionaler Kategorie und Nutzungsdauern abgebildet. Abbildung 6-10 zeigt entsprechend die Verteilung der Lebenszykluskosten in den unterschiedlichen Szenarien.

Die Auswertung der Typräume zeigt die unterschiedliche Relevanz der funktionalen Kategorien:

- Das **Tragwerk** hat einen hohen Einfluss auf die jährliche Kostenbelastung. Diese sinkt bei steigender Nutzungsdauer. Bei den Umweltwirkungen verhält es sich gleich: der Einfluss des Tragwerks verringert sich deutlich, wenn eine Lebensdauer von 80 Jahren angenommen wird und erhöht sich stark, wenn das Gebäude nach 30 Jahren bereits abgerissen wird.
- Die Kosten für die **Fassade** werden nur geringfügigen Schwankungen unterworfen. Diese Kosten setzen sich jedoch jeweils unterschiedlich zusammen. Das jährliche GWP nimmt ausgehend von der Standardlebensdauer stark zu. Spezifisch gesehen schwankt es stark, am gesamten GWP je Lebensdauer hat die Fassade allerdings nur einen geringen Anteil.
- Die funktionale Kategorie des **Innenausbau**s ist bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren am günstigsten und steigt, wenn der Betrachtungszeitraum erhöht oder verringert wird und ebenso, wenn ein Mieterwechsel mit in die Betrachtung einbezogen wird. Dies kann durch die häufigen Austauschraten (Phase B4) der Gebäudebestandteile erklärt werden. Das jährliche GWP des Innenausbau ist bei einer Lebensdauer von 50 Jahren (ohne Mieterwechsel) und 80 Jahren nahezu identisch, wobei der Einfluss der Phase B4 stark ansteigt. Ein Mieterwechsel nach 30 Jahren erhöht das GWP signifikant.

- Die resultierende jährliche Kostenbelastung bezogen auf die **Dämmung und Abdichtung der Bodenplatte und des Daches** bleibt in den unterschiedlichen Szenarien weitestgehend gleich. Die Kostenanteile der einzelnen Lebenszyklusphasen verändern sich jedoch stark. Dies kann analog beim GWP beobachtet werden.
- Die Kosten für die **Fenster und Türen** sind bei einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren am günstigsten. Bei den anderen Szenarien fallen besonders die Kosten für die Instandsetzung (B4) ins Gewicht. Vor dem Hintergrund der Höhe des jährlichen GWP wäre eine Lebensdauer des Gebäudes von 80 Jahren zu empfehlen, obwohl die Phase B4 gegenüber einer Lebensdauer von 30 Jahren stark an Einfluss zunimmt.
- In der Gruppe der **Sonstigen** Bauteile fallen bei einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren die geringsten jährlichen Kosten an. Die anderen Szenarien weisen ähnliche jährliche Belastungen auf. Dies kann ebenfalls beim GWP beobachtet werden. Die Phase B4 ist fast immer maßgebend.

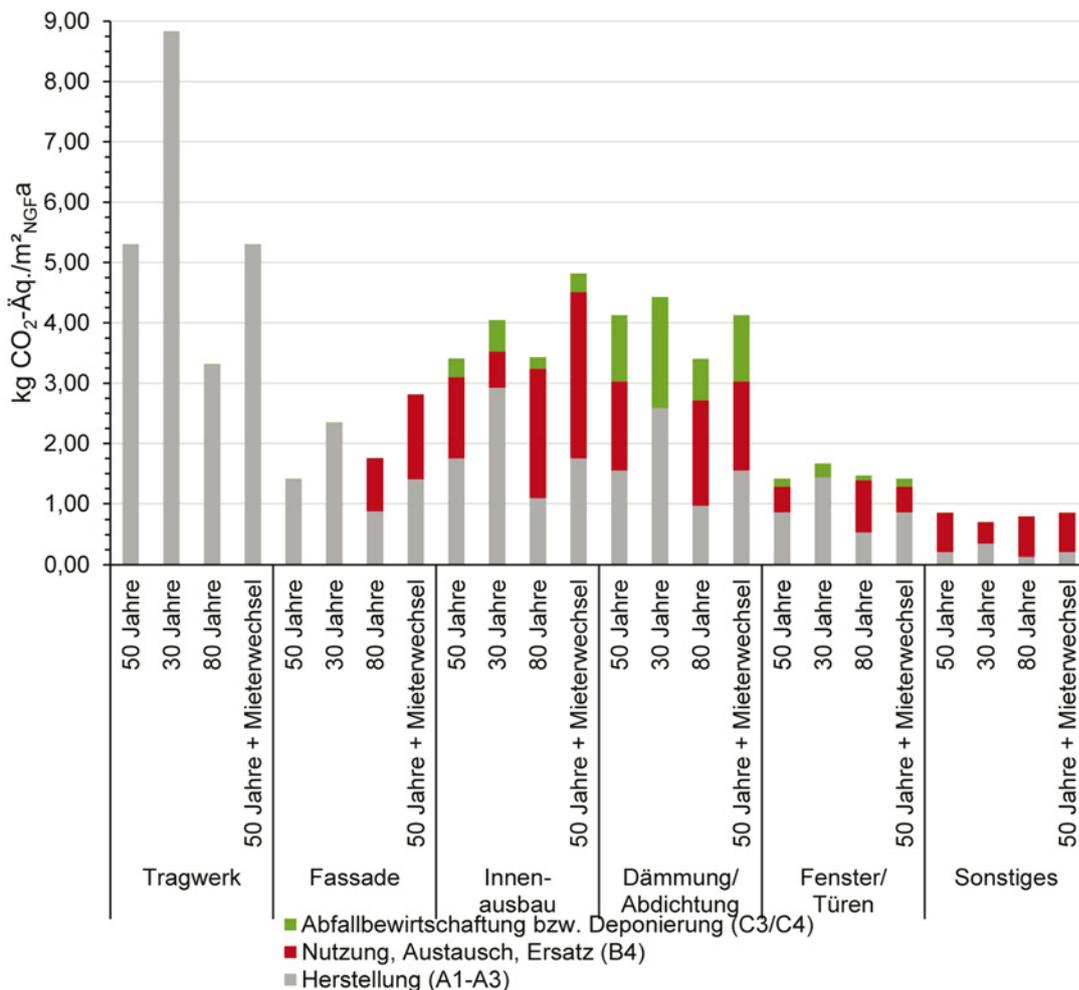


Abbildung 6-9: Verteilung des GWP pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr in den Szenarien mit einer Auswertung nach funktionalen Kategorien (eigene Darstellung)

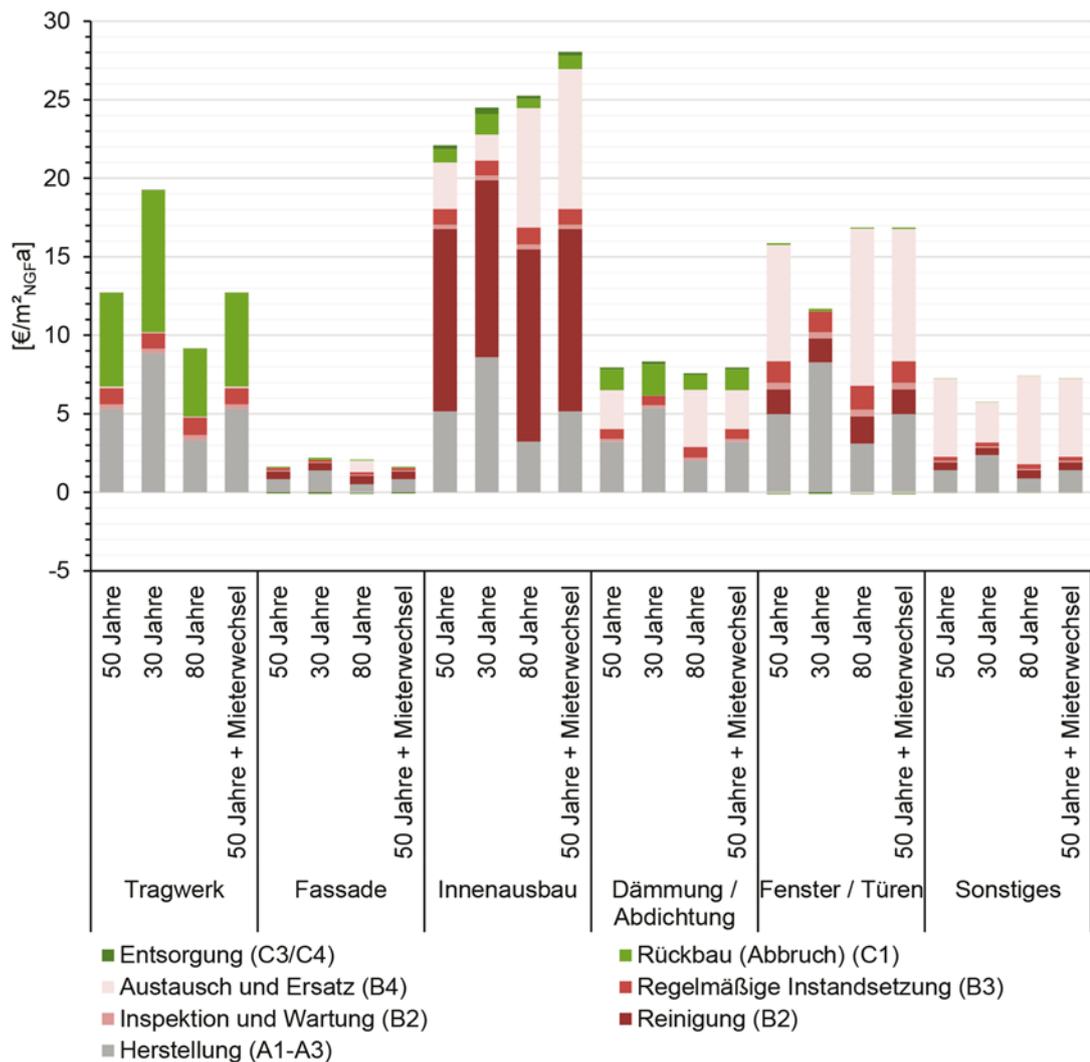


Abbildung 6-10: Verteilung der Lebenszykluskosten pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr in den Szenarien mit einer Auswertung nach funktionalen Kategorien (eigene Darstellung)

### 6.3 Detaillierte Berechnung der TGA Projekt A

Die Bilanzierung der technischen Gebäudeausrüstung ist komplex und zeitaufwändig. Ohne eine detaillierte Planungsdokumentation ist es im Gegensatz zur Baukonstruktion schwierig, vereinfachte Annahmen zu treffen.

Zwar ist es möglich, überschlägige Rohrleitungslängen für Heizsysteme, Kühlsysteme oder zur Trinkwarmwasserverteilung nach DIN V 18599 Teil 5, 8 und 7 zu ermitteln, allerdings sind diese relativ ungenau und abhängig von Netztypen und einzelnen Gebäudegeometrien: werden die Grundrisse komplexer, weichen diese Leitungsbezüge immer mehr von der Realität ab (vgl. DIN V 18599-5:2011-12, Tabelle 22; DIN V 18599-7:2011-12, Abschnitt 6.5.2.3, DIN V 18599-8:2011-12, Tabelle 8). Hinzu kommt, dass diese Schätzungen weniger für die Ökobilanzierung entwickelt wurden, sondern primär der Ermittlung von Leitungsverlusten für Energiebedarfsberechnungen dienen. Das BMVBS (2009, S.53) empfiehlt zudem in seinem Leitfaden für Energiebedarfsausweise im Nichtwohnungsbau, dass die Ermittlung von Leitungslängen über die Ausschreibungstexte oder Revisionsunterlagen erfolgen sollte.

Die TGA der Referenzprojekte wird nach aktuellen DGNB-Vorgaben (vereinfachtes Verfahren) bilanziert. Ins Gebäudemodell einbezogen werden dabei die Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen sowie die Zentralen der lufttechnischen Anlagen, jedoch keine Rohre, Leitungen, Kanäle usw. (DGNB, 2018, S.52). Die Berücksichtigung der restlichen Gebäudekomponenten erfolgt über einen pauschalen Zuschlag von 20 % (siehe auch Kapitel 3.2.1, Seite 17).

Diese Methode hat zwei Schwachstellen:

- Es ist nicht abschließend geklärt, ob der Pauschalwert von 20 % auf alle Gebäudetypen anwendbar ist. Insbesondere Nichtwohngebäude bedürfen, im Gegensatz zu Wohngebäuden, einer umfangreicheren technischen Gebäudeausrüstung, beispielsweise durch höhere Anforderungen an Lüftung und Klimatisierung.
- Die Berücksichtigung über einen pauschalen Zuschlag bedingt Folgefehler. Werden bei der KG 300 beispielsweise Komponenten vergessen oder zu gering berücksichtigt, schlägt sich die Fehlannahme automatisch auch auf die TGA nieder.

Um den Einfluss der TGA innerhalb einer Ökobilanzierung besser bewerten zu können, wurde deshalb am Beispiel von Projekt A zusätzlich eine genaue Ökobilanzierung der KG 410, 420 und 430 durchgeführt (Stoiber, 2018). Dabei werden mit Hilfe der Ausschreibungstexte detaillierte Material- und Massenbilanzen erstellt. Die zusammenfassenden Ergebnisse können Abbildung 6-11 bis Abbildung 6-13 entnommen werden. Das grobe Gebäudetechnikkonzept dazu findet sich im Steckbrief des Projektes (Anhang A1).

Die KG 430 (Lüftungstechnik) besitzt nicht nur die größten Massenanteile, sondern nimmt auch die größte Wirkung am GWP und PENRT ein (55-56 %) (siehe Tabelle 6-3). Ursache hierfür ist der hohe Metallanteil für Lüftungskanäle aus verzinktem Stahl und Edelstahl. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse nach der vereinfachten DGNB-Methode zu günstig berechnet wurden. Bei der direkten Gegenüberstellung von Baukonstruktion und TGA (ohne Phase B6) besitzen die TGA-Komponenten prozentuale Anteile am GWP von 30 % und an der PENRT von 32 % (Stoiber, 2018, S.59). Dabei sind die Kostengruppen der KG 440 bis 490 noch nicht berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass die TGA ein relevantes ökologisches Einflusspotential besitzt und dieses zukünftig bei der Planung besser berücksichtigt werden sollte. Vor allem die Lüftungstechnik kann bei Nichtwohngebäuden ein wesentlicher Treiber sein.

Tabelle 6-3: Projektergebnisse der KG 400 nach vereinfachter und genauer Ermittlung: GWP und PENRT (eigene Darstellung nach (Stoiber, 2018))

Kostengruppe	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> ]		PENRT [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> ]	
	Vereinfachte Ermittlung	Genauere Ermittlung	Vereinfachte Ermittlung	Genauere Ermittlung
KG 410	0,00	0,82	0,00	11,37
KG 420	0,13	1,37	1,60	14,36
KG 430	0,10	2,84	1,23	32,54
20 % Zuschlag	2,37	-	25,79	-
<b>Gesamt</b>	<b>2,59</b>	<b>5,03</b> <b>(+ 94 %)</b>	<b>28,63</b>	<b>58,27</b> <b>(+ 104 %)</b>

<b>Gesamtanteil der KG 400</b> am Projektergebnis (KG 300 + KG 400 + B6)	<b>18 %</b>	<b>30 %</b>	<b>18 %</b>	<b>32 %</b>
--	-------------	-------------	-------------	-------------

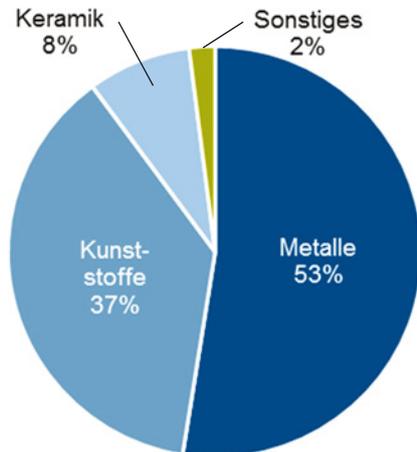


Abbildung 6-11: Prozentuale Massenverteilung der KG 410 (Stoiber, 2018)

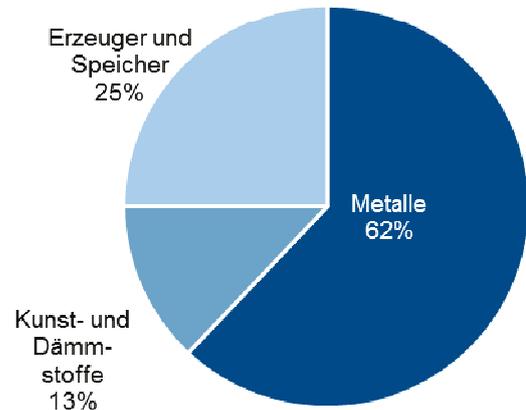


Abbildung 6-12: Prozentuale Massenverteilung der KG 420 (Stoiber, 2018)

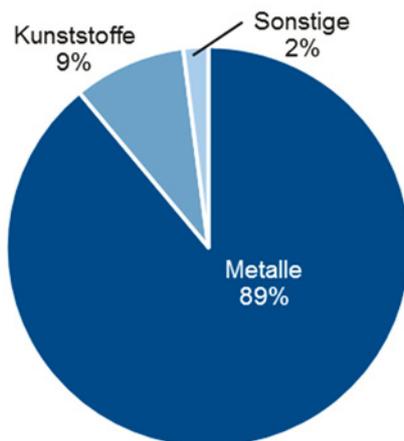


Abbildung 6-13: Prozentuale Massenverteilung der KG 430 (Stoiber, 2018)

## 6.4 Energieversorgung

Da der betriebliche Energieeinsatz (Phase B6) sowohl den größten Einfluss auf die Umweltwirkungen aufweist (Kap. 5.1) als auch für die Lebenszykluskosten eine große Rolle spielt (Kap. 5.2.4), wird auf der Basis der vorliegenden Energieberechnungen eine vereinfachte Variantenstudie durchgeführt, um Optimierungspotentiale in frühen Planungsphasen zu identifizieren.

### 6.4.1 Vergleich Energiebedarf der Projekte

Zunächst werden die Ergebnisse der Energieberechnungen analysiert (Tabelle 6-4). Dabei zeigt sich, dass sich der Nutzenergiebedarf der Gebäude stark unterscheidet. Projekt A hat den höchsten Heizwärmebedarf, Projekt D weist den höchsten Kühl- und Beleuchtungsbedarf auf und gleichzeitig den geringsten Heizwärme- und Warmwasserbedarf. Projekt C hat den geringsten Kühl- und Beleuchtungsbedarf. Der sehr hohe Warmwasserbedarf des Projektes C ist auf den ungewöhnlich großen Anteil an Sanitärflächen zurückzuführen und kann nicht verallgemeinert werden.

Tabelle 6-4: Ergebnisse der EnEV-Berechnungen der Beispielprojekte (eigene Darstellung)

		Projekt A	Projekt B	Projekt C	Projekt D	Projekt E
Nutzenergiebedarf nach EnEV (kWh/m <sup>2</sup> a)	Heizung	137,93	74,17	96,2	59,6	110,12
	Lüftung	0	0	28,3	0	0
	Warmwasser	9,4	5,54	55,2	3,94	2,66
	Kühlen	22,32	32,6	16,1	37,89	8,26
	Beleuchtung	13,18	13,93	10,3	21,06	11,15
Endenergiebedarf nach EnEV (kWh/m <sup>2</sup> a)	Heizung	38,87	84,35	2,8	38,52	125,61
	Lüftung	23,8	26,9	28,3	2,9	2,23
	Warmwasser	12,19	7,97	27,4	4,19	3,85
	Kühlen	1,46	12,99	19,5	1,94	1,06
	Beleuchtung	13,18	13,93	10,3	21,06	11,15
Erzeugernutzenergiebedarf laut Nachweis EEWärmeG (kWh/m <sup>2</sup> a)	gesamt	158	132	220	94	133

Tabelle 6-5: Mögliche bauliche Einflussgrößen auf den Energiebedarf der Beispielprojekte (eigene Darstellung)

		Projekt A	Projekt B	Projekt C	Projekt D	Projekt E
Mittlere U-Werte (W/m <sup>2</sup> K)	opake Außenbauteile	0,185	0,257	0,24	0,244	0,254
	transparente Abt.	1,4	1,3	1,02	0,835	1,3
	Vorhangfassade	-	1,2	-	-	-
	Glasdächer, Lichtbänder,...	-	-	-	-	-
	HT'	0,495	0,327	0,41	0,49	0,57
A/V Verhältnis (1/m)		0,41	0,37	0,27	0,25	0,28
Fensterflächenanteil (%)		45	27	41	35	29

In Tabelle 6-5 sind die wichtigsten baulichen Kennwerte dargestellt, die Einfluss auf den Energiebedarf nehmen. Die einzige ablesbare Parallele ergibt sich bei der Betrachtung der transparenten Außenbauteile. Im Projekt D haben diese einen wesentlich niedrigeren U-Wert als die Vergleichsprojekte, so dass Projekt D einen geringeren Heizwärmebedarf aufweist. Da das Projekt gleichzeitig den höchsten Fensterflächenanteil besitzt, ist der Kühlbedarf relativ hoch. Allerdings wäre anzunehmen, dass aufgrund des hohen Fensterflächenanteils auch der Beleuchtungsbedarf niedrig wäre. Dies ist aber nicht der Fall. Ein Vergleich mit Projekt C, das einen ähnlichen hohen Fensterflächenanteil aufweist, zeigt, dass hier trotz hohem Fensterflächenanteil der niedrigste Kühlbedarf und Beleuchtungsbedarf vorliegt.

Projekt A mit dem höchsten Heizenergiebedarf hat den besten mittleren U-Wert der opaken Außenbauteile, den höchsten und somit schlechtesten U-Wert der transparenten Außenbauteile und das höchste A/V Verhältnis, ist also am wenigsten kompakt. Dies deutet darauf hin, dass zwischen durchschnittlichen U-Wert aller Außenbauteile und Heizwärmebedarf ein direkter Zusammenhang abgelesen werden kann, ein Blick auf Projekt D bestätigt dies aber nicht. Der Unterschied zwischen Projekt A und Projekt D besteht dagegen im A/V Verhältnis. Ein direkter Zusammenhang zwischen A/V Verhältnis und Heizenergiebedarf lässt sich aber für Projekte B und C nicht nachweisen. Die Ergebnisse können nur im Zusammenspiel aller Faktoren gelesen werden.

Insgesamt zeigt sich, dass sich aufgrund der komplexen Zusammenhänge, wie zum Beispiel der Zonierung der einzelnen Gebäude bei der Bestimmung des Energiebedarfs von Bürogebäuden aus den baulichen Gegebenheiten keine direkten einfachen Schlussfolgerungen hinsichtlich des Energiebedarfs ableiten lassen.

Dadurch kann für frühe Planungsphasen nur die sehr allgemeine Empfehlung ausgesprochen werden, den Betriebsenergiebedarf so früh wie möglich zu berechnen,

- , sobald gesicherte Informationen über die Geometrie des Gebäudes vorliegen, um daraus Empfehlungen für die energetische Qualität der Gebäudehülle abzuleiten. Detailliertere Untersuchungen sind nicht thematischer Schwerpunkt des vorliegenden Projektes, sondern sollten in zukünftigen Forschungen erfolgen.

#### 6.4.2 Vergleich Energieversorgung der Projekte

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Energieversorgung und den Ergebnissen der LCA analysiert. Tabelle 6-6 fasst die Versorgung der einzelnen Projekte vergleichend zusammen. Die Ergebnisse der LCA und LCC sind in den Kapiteln 5.1.4.8 und 5.2.4 dargestellt und in Abbildung 6-14 vergleichend zusammengefasst.

Tabelle 6-6: Energieversorgung (Quelle: Energieberechnungen der Beispielprojekte)

	Projekt A	Projekt B	Projekt C	Projekt D	Projekt E
Heizung, WW	W-W-Wärmepumpe, BHKW (Erdgas)	Brennwertkessel (Erdgas)	Erdsonden W-W-WP, BHKW (Erdgas), Solarkollektoren, Brennwertkessel (Erdgas)	Sole-Wasser-Wärmepumpe, Brennwertkessel (Erdgas)	Fernwärme, PE-Faktor 0,11
Raumluftechnik	mit WRG, Heizung, Kühlung, Befeuchtung	mit WRG, Heizung, Kühlung	mit WRG, ohne Konditionierung	mit WRG, Heizung, Kühlung, Befeuchtung	mit WRG, Heizung, Kühlung
Kühlung	Geothermie (Grundwasser)	Kompressionskältemaschine	Absorptionskältemaschine	Kompressionskältemaschine	Kompressionskältemaschine
Beleuchtung	Strom-Mix, BHKW	Strom-Mix	Strom-Mix, BHKW	Strom-Mix	Strom-Mix
Primärenergiebedarf nach EnEV (kWh/m <sup>2</sup> a)	162,44	140,02	152,9	102,89	35,76

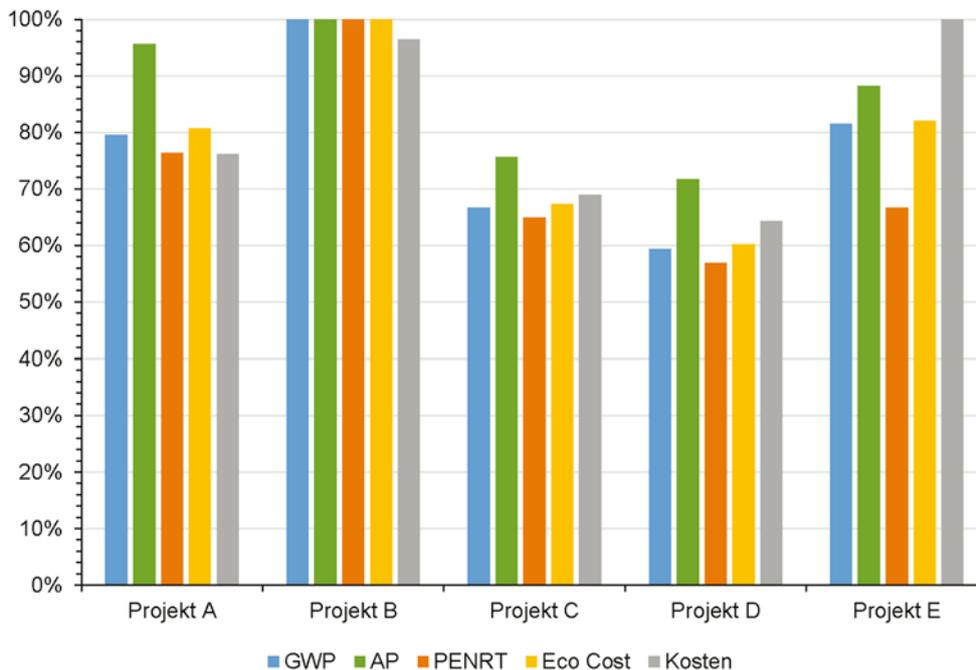


Abbildung 6-14: Vergleich der Beispielprojekte hinsichtlich GWP, AP, PENRT Eco-Costs und Kosten der Phase B6 (relative Werte, eigene Darstellung)

Der Vergleich der Projekte zeigt, dass Projekt B in allen Indikatoren der LCA die höchsten Werte aufweist. Da dieses Projekt in den Energiebedarfswerten keine Extreme zeigt, liegen die hohen Werte in der konventionellen Wärme- und Kälteerzeugung begründet.

Projekt E hat die höchsten Betriebskosten, dicht gefolgt von Projekt B. Dies liegt in diesem Fall am hohen Endenergiebedarf für die Heizung (s. Tabelle 6-4), der durch

vergleichsweise etwas teurere Fernwärme (0,077 € pro kWh im Vergleich zu 0,06 € pro kWh für Gas) gedeckt wird.

Projekt D schneidet in allen Kategorien am besten ab. Dies kann auf einen geringen Heizwärmebedarf in Kombination mit zum Teil erneuerbarer Energieerzeugung zurückgeführt werden.

Die Berechnung der Eco-Costs liefert von der Tendenz her die gleichen Ergebnisse wie der Vergleich des GWP der Projekte. Allerdings liegen die Projekte A und E näher aneinander, da Projekt A ein höheres AP aufweist.

Es ist anzumerken, dass die LCA-Werte und die Investitions- und Wartungskosten der TGA im Vergleich nicht berücksichtigt sind, da sie vereinfacht berechnet wurden (vgl. Kapitel 6.3). Zu diesem Thema besteht weiterer Forschungsbedarf (s. auch Kapitel 6.3).

### 6.4.3 Varianten Energieversorgung

Um den Einfluss der Energieversorgung auf die Ergebnisse der LCA zu untersuchen, wurden die Ergebnisse der LCA in Varianten berechnet. Für eine solche Hochrechnung erwies sich der Erzeugernutzwärme bzw. -kälte (Tabelle 6-7) als die geeignete Basisgröße, da die Anlagentechnik auf diesen keinen Einfluss hat. In aufgeschlüsselter Form nach Heizung, Kühlung und Warmwasser lagen diese Ergebnisse nur für die Projekte A, B und D vor, so dass sich die Variantenstudie auf diese Projekte beschränkt. Der Strombedarf für die Beleuchtung wurde ebenfalls berücksichtigt. Diese Variantenrechnung vereinfacht stark die komplexen Einflussgrößen des Betriebsenergiebedarfs, um den Einfluss der Versorgung auf die LCA zu isolieren. Sie stimmt daher nicht mit den berechneten Ergebnissen überein (Kap. 5.1.3). Detaillierte, projektbezogene Optimierungen des Betriebsenergiebedarfs in frühen Planungsphasen können nur mit Hilfe von Berechnungen in Varianten entwickelt werden. Für eine Vereinfachung der DIN V 18599 Berechnung für frühe Planungsphasen besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Tabelle 6-7: Erzeugernutzwärme und -kälte und Strombedarf Beleuchtung (Quelle: Energieberechnungen der Beispielprojekte)

	Projekt A	Projekt B	Projekt D
Heizung (kWh/m <sup>2</sup> a)	119,97	82,68	79,92
Trinkwarmwasser (kWh/m <sup>2</sup> a)	12,15	7,93	8,49
Kühlung (kWh/m <sup>2</sup> a)	25,66	41,60	5,72
Beleuchtung (kWh /m <sup>2</sup> a)	13,18	13,93	21,06

Für die Variantenstudie werden fünf Versorgungsvarianten aufgestellt (Tabelle 6-8), für die jeweils eine Bilanz für die Betriebsphase berechnet wird. Der Datensatz "Strom aus Windkraft" wird als Repräsentant für regenerative Stromerzeugung verwendet, da die Ökobaudat derzeit keinen für die Berechnung des Gebäudebetriebs verwendbaren Datensatz für die Erzeugung durch gebäudeintegrierte Photovoltaikanlagen beinhaltet. Der Datensatz Röhrenkollektor (1m<sup>2</sup> und Jahr) wird auf 1 kWh umgerechnet. Für die Energieerzeugung durch KWK in Blockheizkraftwerken stehen leider keine Daten in der Ökobaudat zur Verfügung. Für die Betrachtung von Nichtwohngebäuden besteht hier eine Lücke.

Tabelle 6-8: Varianten (Ökobaudat-Datensätze (BMI, o.J.))

	Standard1	Standard2	Standard3	Öko1	Öko2
Beleuchtung	Beleuchtung (Verbrauch 1kWh Strom)	Beleuchtung (Verbrauch 1kWh Strom)	50 % Strom aus Windkraft, 50 % Strom-Mix	Strom aus Windkraft	Strom aus Windkraft
Heizung	Fernwärme 120-400 kW	Gas Brennwert 120-400 kW	Gas Brennwert 120-400 kW	Strom-WP Wasser-Wasser (10/35)	Fernwärme aus Biomasse
TWW	Fernwärme 120-400 kW	Gas Brennwert 120-400 kW	Röhrenkollektor (1m <sup>2</sup> und Jahr)	Röhrenkollektor (1m <sup>2</sup> und Jahr)	Fernwärme aus Biomasse
Kühlung	Raumklima-gerät >12 kW (SEER 4,7)	Strom für Gebäudebetrieb 2017 (Annahme: SEER 5,0)	50 % Strom aus Windkraft, 50 % Strom-Mix (Annahme: SEER 5,0)	Strom-WP Wasser-Wasser (10/35)	Strom aus Windkraft

Abbildung 6-15 zeigt, dass die Projekte jeweils in Abhängigkeit der Energieversorgung ein sehr unterschiedliches GWP aufweisen. Für alle Projekte ist der Erzeugernutzenergiebedarf Heizung der größte Verursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen, gefolgt von Beleuchtungs- und Kühlenergiebedarf. Die Erzeugung von Trinkwarmwasser spielt in allen Projekten nur eine untergeordnete Rolle, da es sich um Bürogebäude mit geringem Trinkwarmwasserbedarf handelt. Daher emittiert das Projekt A mit dem höchsten Erzeugernutzenergiebedarf Heizung innerhalb einer Variante der Versorgung jeweils am meisten CO<sub>2</sub>. Wird aber Projekt A zum Beispiel mit Standard 3 oder „Öko“ versorgt, emittiert es weniger CO<sub>2</sub> als das Projekt D mit dem geringsten Erzeugernutzenergiebedarf Heizung. Hier zeigt sich, dass ein Projekt, das auf der Bedarfsseite weniger optimiert ist, dennoch weniger CO<sub>2</sub> emittiert als ein auf der Bedarfsseite optimiertes Projekt, wenn es regenerativ versorgt wird. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Stromversorgung bei Projekt D mit dem höchsten Beleuchtungsbedarf eine größere Stellschraube darstellt als bei den Projekten A und B.

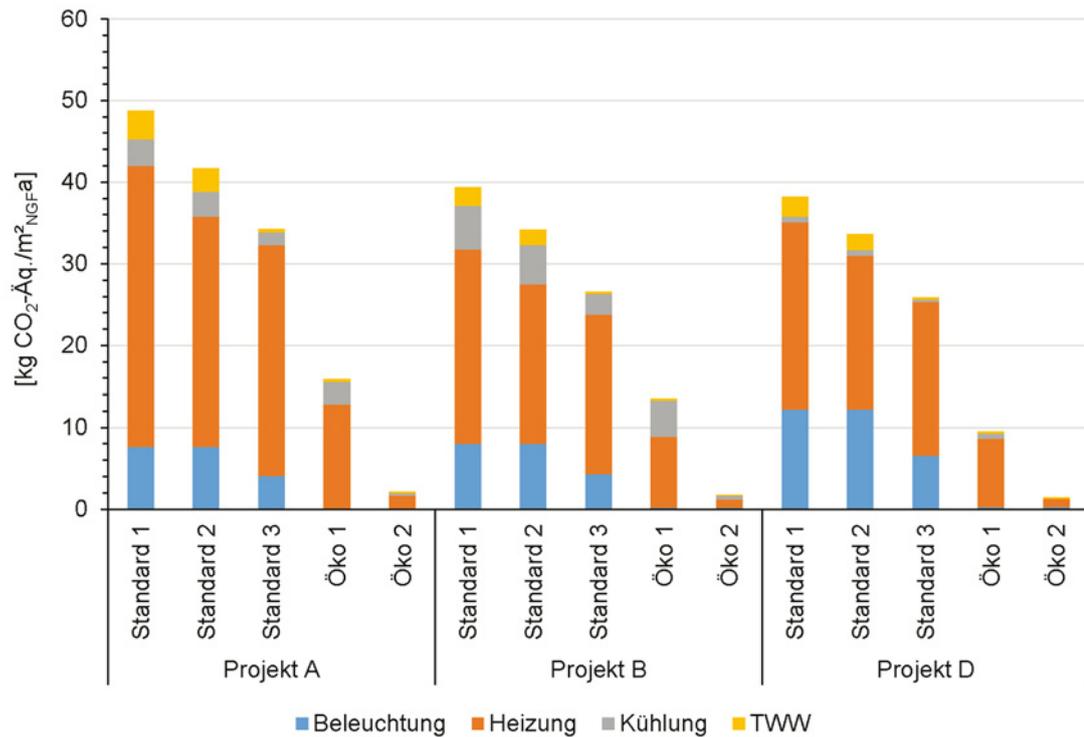


Abbildung 6-15: Variantenvergleich GWP (eigene Darstellung)

Vergleicht man die Varianten hinsichtlich des Versauerungspotentials (Abbildung 6-16), ist festzustellen, dass ebenfalls der Erzeugernutzenergiebedarf Heizung die ausschlaggebende Größe darstellt. Allerdings weisen die Varianten Öko 1 und Öko 2 z.T. höhere Werte auf als die „Standard“ Varianten. Besonders die Variante Öko 2, die durch Biomasse erzeugte Fernwärme verwendet, verursacht ein hohes Versauerungspotential. Für das Projekt A mit dem höchsten Erzeugernutzenergiebedarf Heizung führt dies dazu, dass die Variante Öko 2 bezüglich des Versauerungspotentials am schlechtesten von allen Versorgungsvarianten abschneidet.

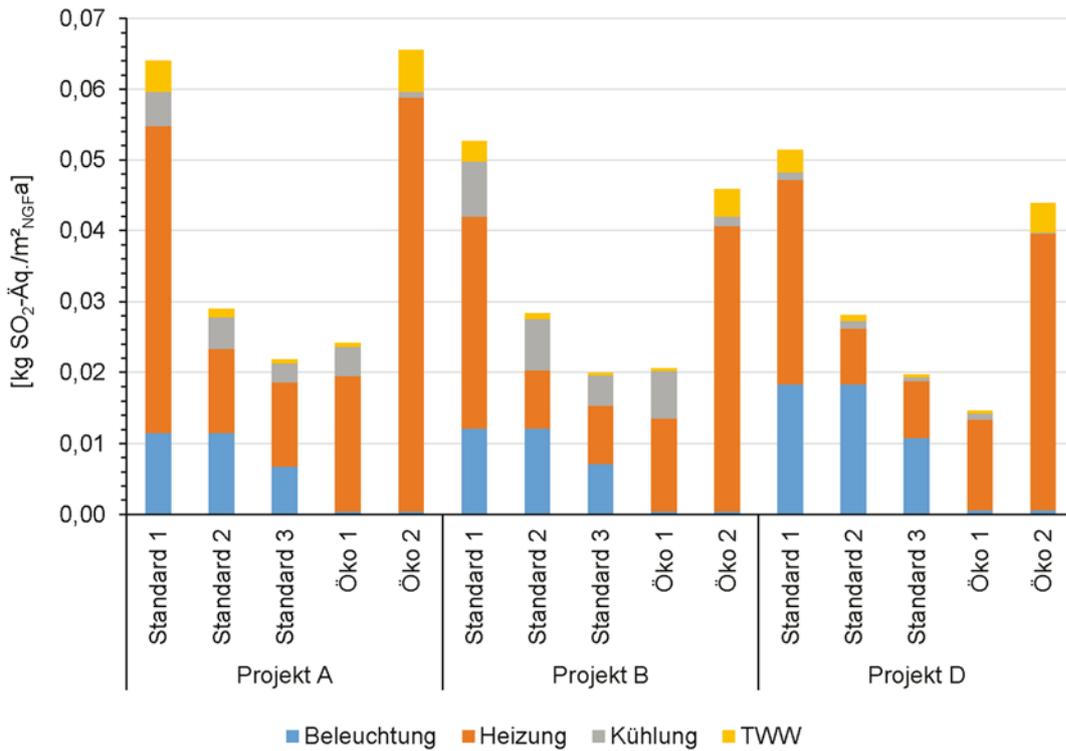


Abbildung 6-16: Variantenvergleich AP (eigene Darstellung)

Um die Ergebnisse einzuordnen, werden aus den Ergebnissen der LCA die Eco-Costs der Versorgungsvarianten ermittelt (Abbildung 6-17). Hieraus ergibt sich ein ähnliches Bild zur Bewertung nach Treibhauspotential, d.h. die Tendenz der Bewertung nach Treibhauspotential kann für eine Entscheidungsfindung herangezogen werden.

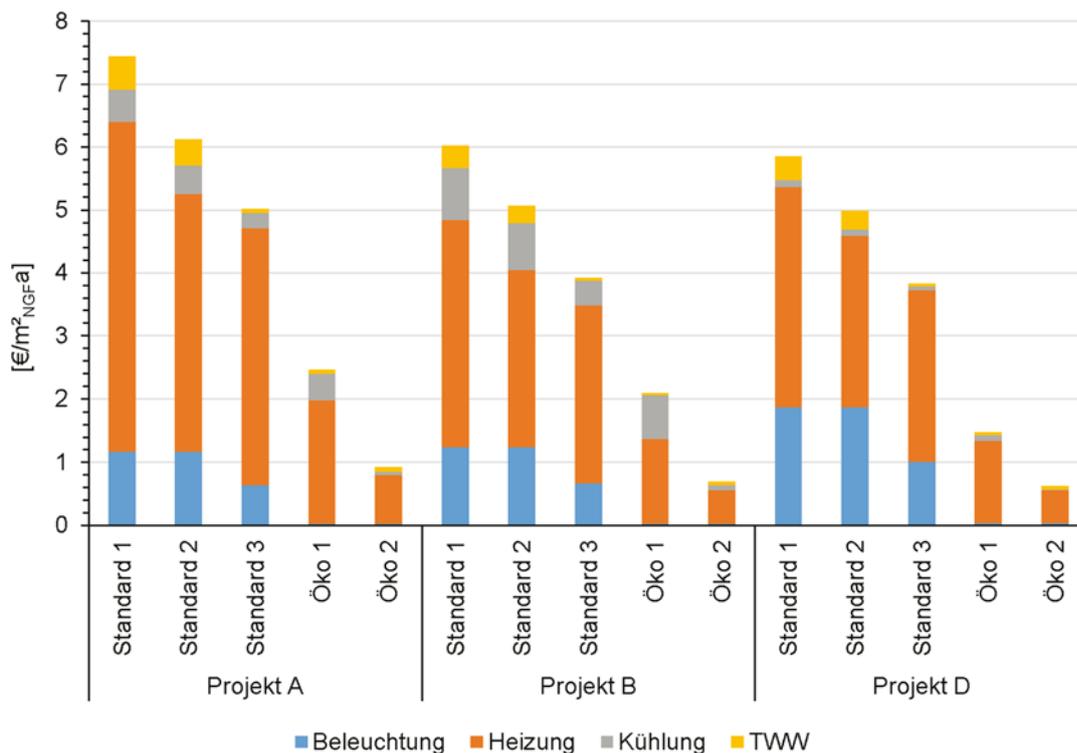


Abbildung 6-17: Variantenvergleich Eco-Costs

Eine Senkung der Umweltwirkungen setzt in erster Linie bei der Versorgung an, nachdem ein guter Standard des Gebäudes erreicht ist. Hierbei werden die besten Ergebnisse erzielt, wenn zunächst der größte Bedarf regenerativ versorgt wird, in den betrachteten Projekten der Erzeugernutzenergiebedarf der Heizung. Bei einer Versorgung mit Biomasse ist das Versauerungspotential in die Überlegungen miteinzubeziehen. An zweiter Stelle steht der Strombedarf für die Beleuchtung, dessen regenerative Versorgung zu einer weiteren Senkung der Umweltwirkungen führt.

Weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Betriebsphase B6 besteht in Möglichkeiten der Bedarfsabschätzung und der Abschätzung von Investitions- und Lebenszykluskosten in frühen Planungsphasen, ebenso wie zu der Wirkungskategorie Versauerungspotential.

## 6.5 Bauteilvarianten aus den Projekten A, C und E

Innerhalb der drei Beispielprojekte A, C und E, die ein Spektrum gängiger Bauteile umfassen, werden die Regelbauteile identifiziert. Dies sind die Bauteile, die im jeweiligen Projekt durch ihre hohen Flächenanteile prägend wirken.

Sie werden auf der zweiten Ebene der KG (KG 320 bis 360) untersucht und gegenübergestellt. Die Massen der bestimmenden Bauteile auf dieser Ebene sind bereits früh im Planungsprozess anhand von Entwurfsständen oder -varianten ermittelbar, und es bestehen in der Regel bereits früh Vorstellungen ihres prinzipiellen Schichtaufbaus. Die KG 334 wird ergänzend auf der dritten Ebene hinzugezogen, da die Fensterflächen ebenfalls eine in frühen Planungsphasen behandelte strategische Variable bilden.

Aus den identifizierten Regelaufbauten wurde ein Typenkatalog zusammengestellt, der pro KG ein bis zwei Bauteile jedes Projekts abbildet. Die Aufbauten spiegeln verschiedene Ausführungen aufgrund verschiedener Anforderungen wieder, bspw. an Beläge, Revisionierbarkeit, Oberflächen). Ihre Aufbauten sind in den Diagrammen in Abkürzungen wiedergegeben, ihre ausführliche Beschreibung kann Anhang A2 entnommen werden.

### 6.5.1 LCA

#### 6.5.1.1 Methodische Vorgehensweise

Da sich in den vorangegangenen Untersuchungen zeigte, dass sich die Tendenzen der Umweltwirkungen bei GWP, PENRT und AP ähnlich verhalten (vgl. Kap. 5.1.2), wird die Betrachtung hier auf das GWP eingeschränkt.

Auch bei der Untersuchung anhand Eco-Costs und der externen Kosten (vgl. Kap. 5.3) erwies sich das GWP mit Abstand als der größte Eco-Kostentreiber; da aber die Zuweisung eines monetären Wertes in € für die Emission von kg CO<sub>2</sub>-Äq. nicht eindeutig zu definieren ist, ist eine Betrachtung des eindeutig zu ermittelnden GWPs aussagekräftiger. Da bei biogenen Baustoffen und bei solchen mit hohem Recycling-

potential (insbesondere Metalle) die Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen erheblichen Umfang annehmen können, wird die Phase D hier zusätzlich dargestellt.

### 6.5.1.2 Gründung – KG 320

Die Gründungsbauteile basieren zumeist auf einer Bodenplatte aus Stahlbeton (StB) auf einer Perimeterdämmung (XPS). Darauf kommt ein schwimmender Zementestrich (ZE) auf einer Trittschalldämmung aus EPS oder ein Zementestrich auf Trennlage (TrennZE) angeordnet. Projekt E ist mit einem Hohlboden (HoBo) ausgestattet. Als Bodenbeläge kommen Fliesen, Teppich (Tepp) oder eine Beschichtung zum Einsatz.

Die Untersuchung zeigt, dass bei den Aufbauten der KG 320 mit 55 - 73 % ein Großteil des Treibhauspotentials bereits in der Herstellungsphase entsteht. Innerhalb dieser erweist sich der Stahlbeton als Treiber, sein Anteil an A1-A3 beträgt 57 - 81 %. Eine stark dimensionierte Bodenplatte wie in Projekt E mit 60cm Stahlbeton wirkt sich hier sichtbar aus.

Die in der Phase (B4) bilanzierten Wirkungen entstehen im Wesentlichen durch Schichten, die in der Praxis nicht ausgetauscht würden, wie z.B. Dämmschichten und Folien die sich unterhalb langlebigerer Schichten befinden. Hier zeigt sich eine Diskrepanz zwischen den vordefinierten Nutzungsdauern und der Praxis.

Beispielsweise verursacht bei Projekt A die Perimeterdämmung unter der Bodenplatte bereits 60 % des GWP in Phase B4. Auch für die Trittschalldämmung und Folien unterhalb des Zementestrichs sind theoretisch mehr Instandhaltungszyklen vorgesehen als für den Estrich darüber. Hier erweisen sich die einheitlichen Ansätze der Nutzungsdauern als praxisfremd. Eine individuelle Anpassung würde die Praxisnähe erhöhen. Da sie jedoch auf Kosten der Vergleichbarkeit mit anderen Ökobilanzen, ginge, die auf die voreingestellten Nutzungsdauern zurückgreifen, wird hier darauf verzichtet.

Darüber hinaus werden in der Phase B4 die Wirkungen von Bodenbelägen und ihren Austauschzyklen erkennbar. Unter anderem trägt der Teppichboden (drei Instandhaltungszyklen) hier zur Erhöhung des GWP bei, wohingegen langlebige Beläge, wie Fliesen oder auch Parkett im Betrachtungszeitraum in B4 keine Umweltwirkungen erzeugen.

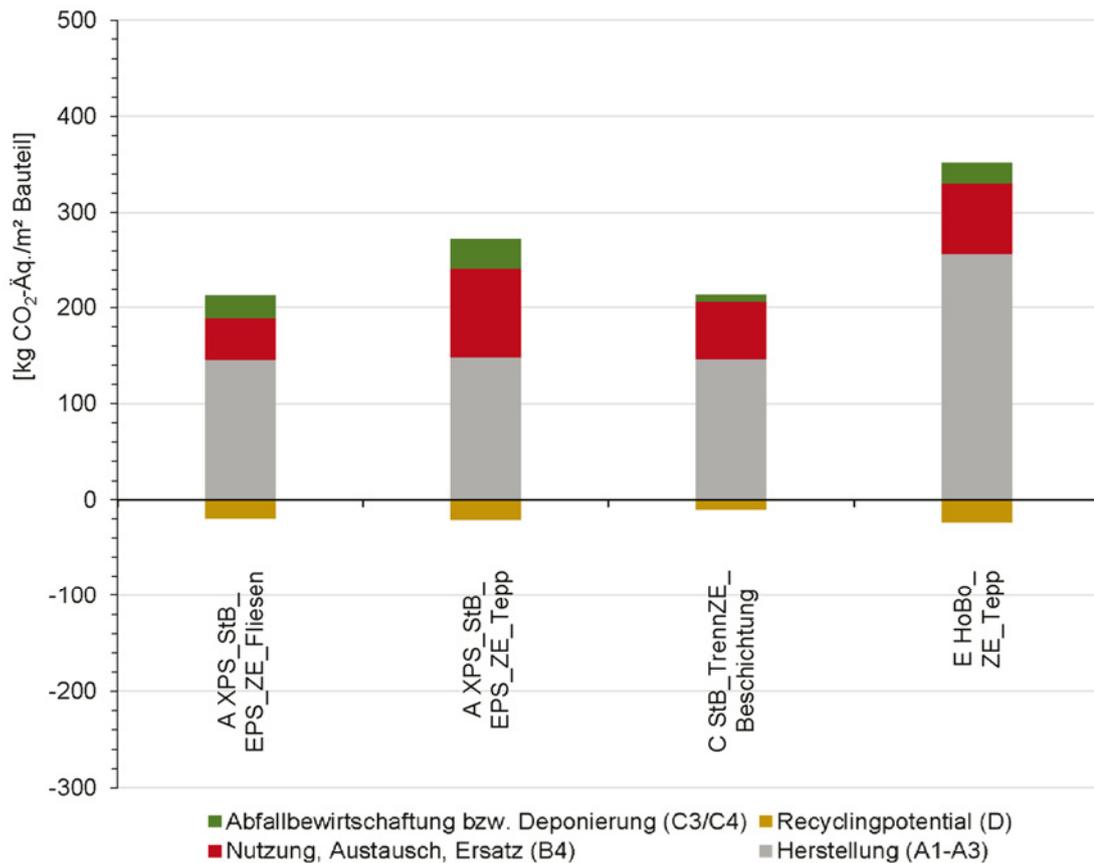


Abbildung 6-18: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 320; Beschreibung der Regelaufbauten siehe Anhang A2 (eigene Darstellung)

### 6.5.1.3 Außenwände – KG 330

Die untersuchten Projekte haben zumeist eine vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) mit einer Bekleidung aus Metallblech, Naturstein (NSt) oder Beton-Fertigteilen (BFt) vor einer massiven Außenwand aus Stahlbeton (StB). Die Dämmung besteht bei allen Projekten aus Mineralfaser.

Bei allen Aufbauten wird die Bilanz des GWP hier fast ausschließlich durch die Herstellungsphase bestimmt. Als Treiber in der Herstellungsphase erweisen sich insbesondere die Metallanteile in der Fassade, wie Bekleidungen aus Metall sowie die Unterkonstruktionen aller Bekleidungen: der Anteil der Fassadenbekleidung inkl. ihrer zugehörigen Metall-Unterkonstruktion an A1-A3 beträgt 56 - 77 %, i. M. 68 %.

Demgegenüber reduziert sich bei diesen Aufbauten der Anteil der Stahlbetonwand auf 22 – 40 %, i. M. 27 % (Phase A1-A3). Bei der Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) steigt der relative Beitrag des Stahlbetons zum GWP in A1-A3 auf 82 %.

Obwohl die Aufbauten mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden sich hier als Treiber des GWP darstellen, bieten sie auch ökologische Vorzüge, die sich in der LCA nicht abbilden. Die betrifft z.B. Vorteile wie eine hohe Instandhaltungs-/ Reparaturfreundlichkeit sowie die Trennbarkeit verschiedener Materialien und die damit einhergehenden Rezykliermöglichkeiten am Ende des Lebenszyklus. Eine sehr aufwendige Unterkonstruktion wie in Projekt C schlägt sich mit ihren hohen Metallmengen im GWP

deutlich niedriger, daher sollte eine optimierte, schlanke Unterkonstruktion angestrebt werden und im Rahmen des konstruktiv und brandschutztechnisch Zulässigen auch alternative Materialien geprüft werden.

Außerhalb der Systemgrenzen des Lebenszyklus (Phase D) weisen die Metalle hingegen umfangreiche Gutschriften auf. Diese „kompensieren“ zwar die Herstellungsphase nicht, nähern die Gesamtbilanz jedoch der des WDVS an.

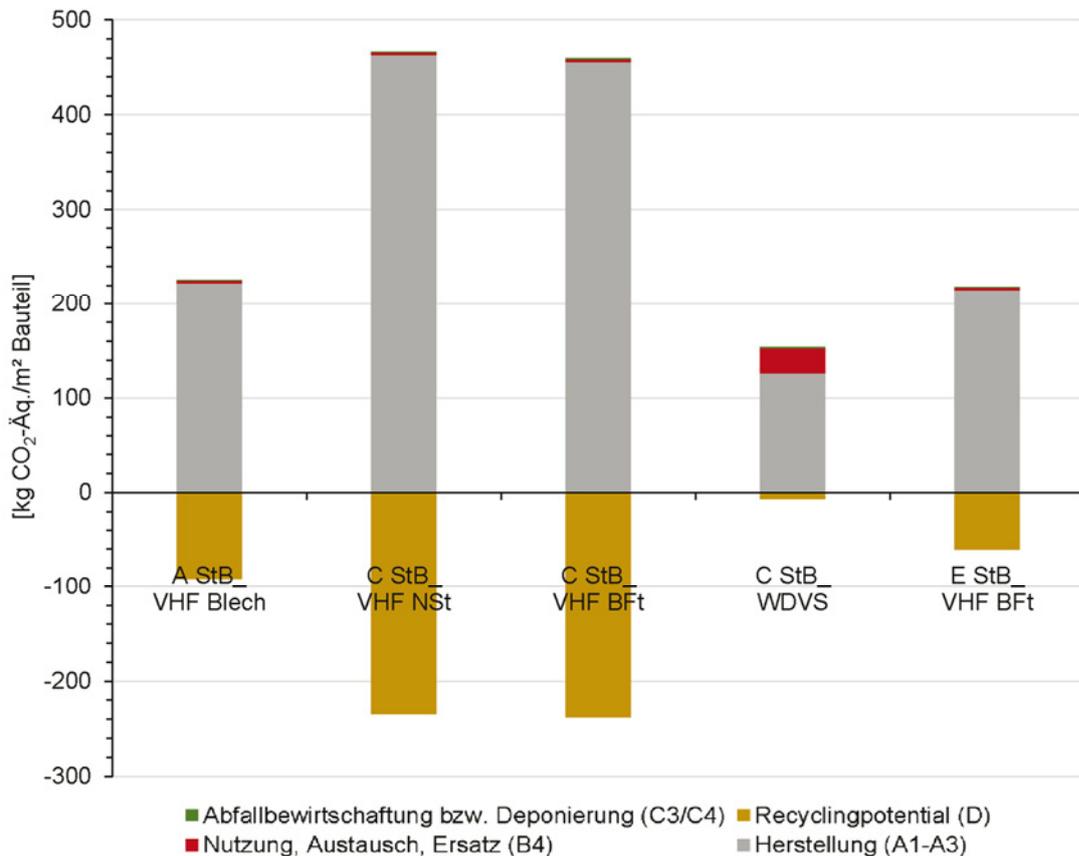


Abbildung 6-19: GWP der Regelaufbauten A, C und E, Kostengruppe 330 (eigene Darstellung)

#### 6.5.1.4 Fenster – KG 334

Mit durchschnittlich 190 kg CO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup> Bauteil weisen die Fenster ein gegenüber den opaken Außenwänden der untersuchten Beispielprojekte geringeres spezifisches GWP auf, vgl. Abbildung 6-20: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 334 (eigene Darstellung) Abbildung 6-20 zu Abbildung 6-19. Alle hier untersuchten Fenster haben Aluminiumprofile. Diese bringen bereits in der Herstellungsphase ein hohes Treibhauspotential mit sich, das auch durch günstige Werte bei der Instandhaltung und am Ende des Lebenszyklus nicht kompensiert wird.

Im Vergleich mit anderen Profil-Materialien liegen sie in den Phasen A-C etwa 30% über Holzprofilen, jedoch immer noch gute 50% unter Kunststoffprofilen, wobei diese Prozentsätze hier nur überschlägige Anhaltspunkte bieten können. Genaue Werte hängen von gewählten Profilquerschnitten, eventuell erforderlichen Verstärkungen und weiteren individuellen Parametern ab, und sind daher im projektspezifischen Einzelfall zu ermitteln.

Bei den hier untersuchten Bauteilen machen die Aluminiumprofile bereits ein Drittel bis hin zur Hälfte der Phase A1-A3 aus, und weisen darauf hin, dass Fensterelemente mit großflächigen Verglasungen und somit einem geringeren Profilanteil eine günstigere Bilanz ergeben.

Die Phase B4 wird gebildet durch einen Instandhaltungszyklus von Verglasung und Fugendichtungsbändern.

Die Fensterelemente mit opaken Anteilen aus Alu-Sandwichpaneelen („C Fe. m.Lüftgskl.“ und „E Fe.Element“) generieren durch ihre hohen Aluminiumanteile Gutschriften in Phase D. Für das Aluminium der Flügel-/ Rahmenprofile hingegen sind gegenwärtig in den Datensätzen noch keine Gutschriften hinterlegt.

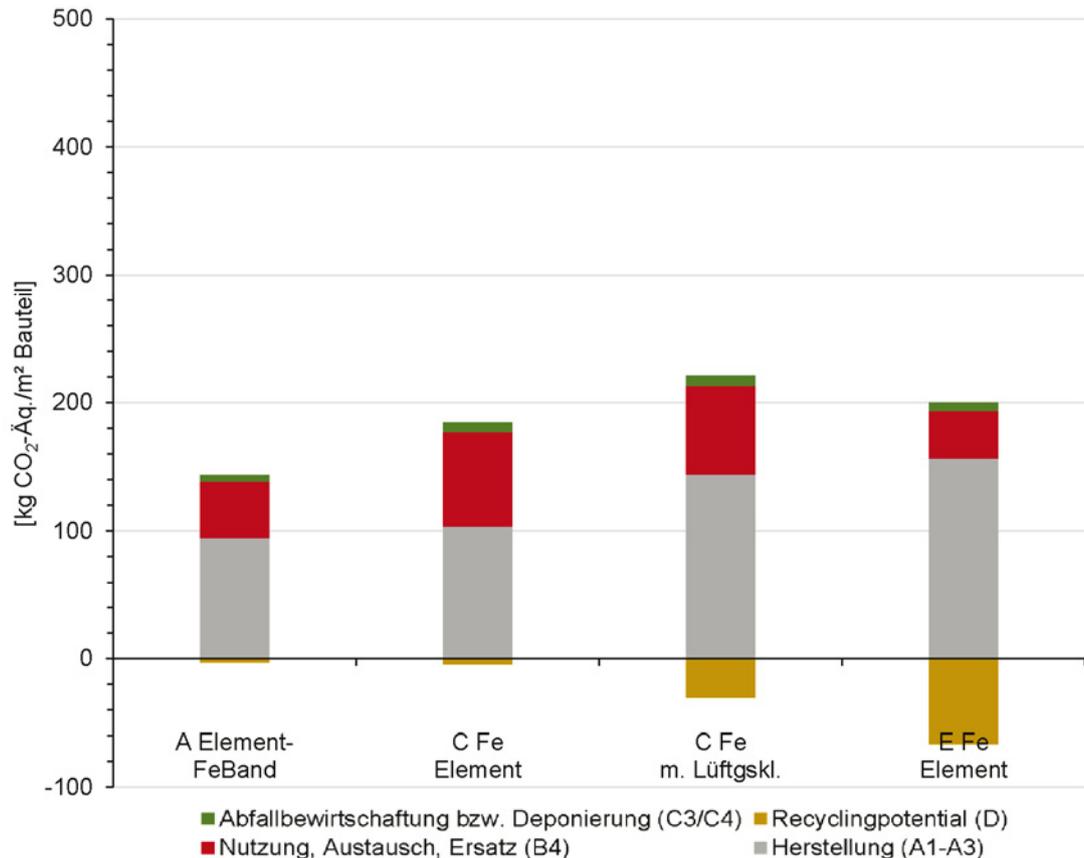


Abbildung 6-20: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 334 (eigene Darstellung)

### 6.5.1.5 Innenwände – KG 340

In Relation zu den anderen Bauteilen auf der zweiten KG-Ebene haben die Innenwände das geringste Treibhauspotential pro m<sup>2</sup> Bauteil. Jedoch treten sie in der Regel in hoher Flächen-Quantität auf, und entwickeln dadurch dennoch Einfluss auf die Gesamtbilanz eines Gebäudes.

Das Treibhauspotential aller Innenwandtypen entsteht fast vollumfänglich in der Herstellungsphase. Der wesentlichste Unterschied zeigt sich zwischen massiven Innenwänden aus 25 cm Stahlbeton und den Leichtbauwänden aus Gipskarton-Bauplatten (GKB). Letztere zeichnen sich durch ein vergleichsweise geringes GWP aus. Bei den

tragenden Stahlbeton-Innenwänden beträgt der Anteil des Stahlbetons an der Herstellungsphase bereits 83 – 94 %. Die schlankere Massivwand aus 17,5cm Mauerziegel hat nur 28 % des GWP der Stahlbetonwände, ist jedoch mit diesen nicht als leistungsgleiches Bauteil vergleichbar, z.B. in statischer Hinsicht.

Phase B4 entsteht durch den alle 15 Jahre zu erneuernden Anstrich, bei der Innenwand von Projekt E zudem durch den Dispersionssilikatputz, für den im Gegensatz zum Kalkgipsputz (KaGiPutz) und Gipsputz (GiPutz), deren Datensätze eine Lebensdauer von 50 Jahren vorsehen, eine Erneuerung bereits nach 30 Jahren in eLCA (BBSR; [www.bauteileditor.de](http://www.bauteileditor.de)) hinterlegt ist.

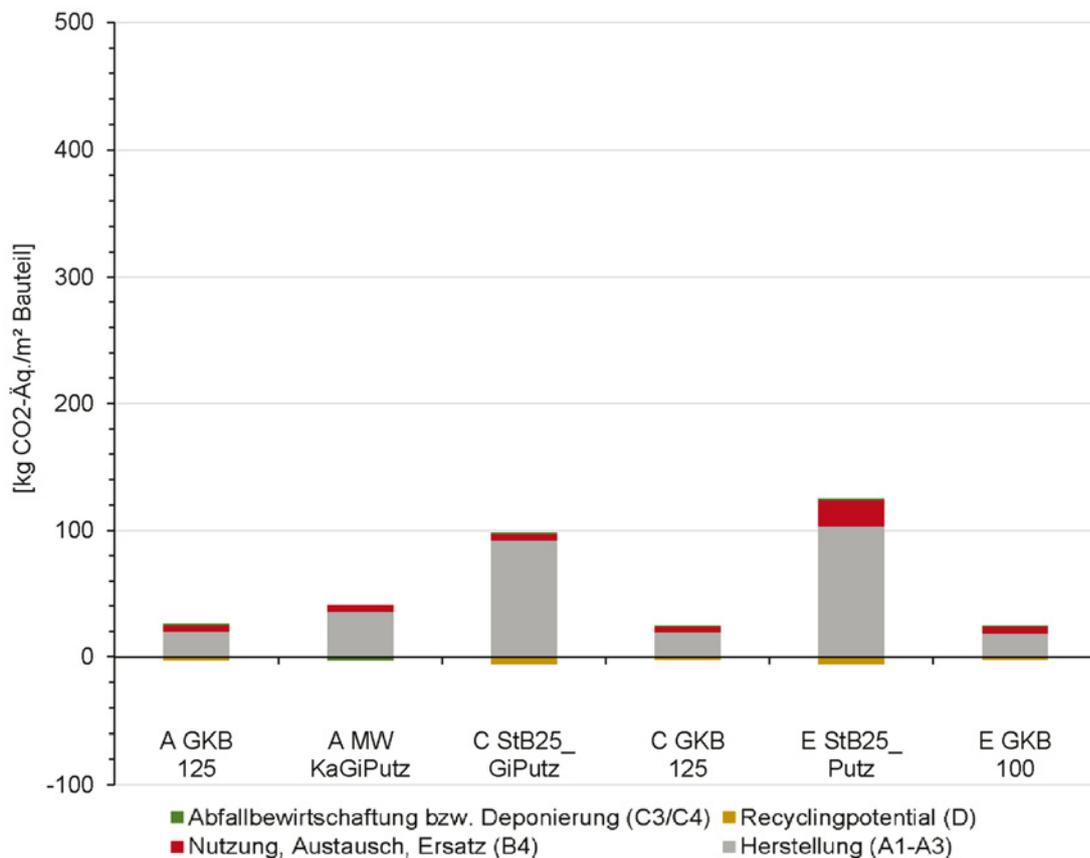


Abbildung 6-21: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 340 (eigene Darstellung)

### 6.5.1.6 Decken – KG 350

Mit 63 - 83 % hat die Herstellungsphase bei den Deckenaufbauten den größten Anteil am Treibhauspotential. Innerhalb dieser Lebenszyklusphase wirkt der Stahlbeton als Treiber, sein Anteil beträgt im Mittel 70 %.

Die Phase B4 trägt im Mittel ein Viertel zum gesamten Treibhauspotential bei. Den größten Einfluss nimmt hier die Wahl des Bodenbelags. Sein Anteil weist mit 22 % (Fliesenbelag) bis hin zu 90 % (Epoxidharzbeschichtung) eine hohe Varianz auf, bleibt im Mittel mit 73 % jedoch relativ hoch. Die Varianz begründet sich auch aus den materialabhängigen Austauschzyklen: Die Fliesen haben mit ihrer Lebensdauer von 50 Jahren keinen Instandhaltungszyklus, und verursachen daher in B4 kein Treib-

hauspotential, wohingegen für den Kautschukbelag (20 J.) zwei Instandhaltungszyklen vorgesehen sind, für den Teppich und die Epoxidharzbeschichtung (15 J.) sogar drei Zyklen. Es zeigt sich, dass es ökobilanziell von Vorteil ist, Belagsmaterialien mit langen Lebensdauern zu wählen.

Auch in der Herstellungsphase bringen die drei letztgenannten Materialien ein doppelt bis viermal so hohes GWP mit sich, wie der Fliesenbelag.

Analog der KG 320 wird auch hier standardmäßig der Austausch von in der Praxis meist länger erhaltenen Schichten (z.B. Dämmung unterhalb Estrich) bilanziert, schlägt sich jedoch im Gesamtergebnis in viel geringerem Maße nieder.

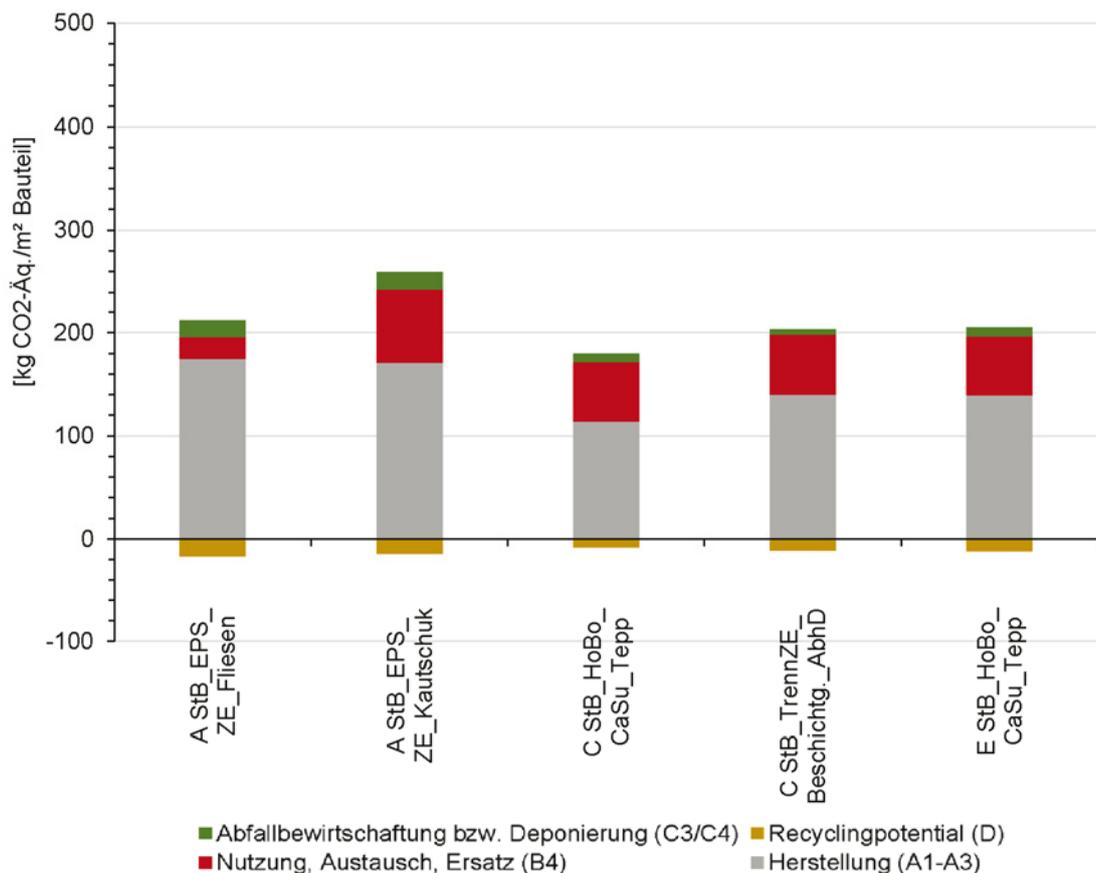


Abbildung 6-22: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 350 (eigene Darstellung)

### 6.5.1.7 Dächer – KG 360

Die Dachaufbauten der untersuchten Projekte bestehen aus einer Stahlbetondecke, auf der eine Dampfsperre, eine Dämmung (EPS) und die Abdichtung aus Bitumen (Bitu) oder Kunststoff (KSt) angeordnet ist. Zwei der Dächer sind bekiest, das in Projekt E hingegen extensiv begrünt.

Bei den Dächern hat die Herstellungsphase mit 50 - 74 % einen wesentlichen Einfluss. Diese wird wiederum durch den Stahlbetonanteil geprägt, der im Mittel bereits 72 % von A1-A3 ausmacht.

Die Phase B4 macht 13 - 34 % aus, und kommt im Wesentlichen durch einen Instandhaltungszyklus von Dämmung und Abdichtung zustande. Besonders bei der Abdichtung ergibt sich hier eine Varianz, je nach Materialität, Stärke und Lagenanzahl. Unterschiedliche Annahmen führen hier schnell zu stark voneinander abweichenden Ergebnissen: für die Kunststoffabdichtung oberhalb der Dämmung im Projekt A bilanziert eLCA erst nach 50 Jahren einen Austausch, für die Bitumenbahnen der Projekte C und E hingegen bei gleicher Einbausituation bereits nach 30 Jahren. Hier widersprechen die hinterlegten Standardnutzungsdauern im Bauteileditor den Nutzungsdauern nach BNB, der für diese Einbausituation materialunabhängig 30 Jahre Nutzungsdauer vorsieht.

Das hier verwendete Gründach konnte hinsichtlich des GWP keine eindeutigen Vorteile zeigen, auch da der eingesetzte Unterbau mit Folien und Dränschichten aus Kunststoff ökobilanziell zu Buche schlägt. Vorteile wie Wasserretention, Verdunstungskühlung und Raum für Biodiversität sprechen dennoch für einen ökologischen Mehrwert des Gründachs.

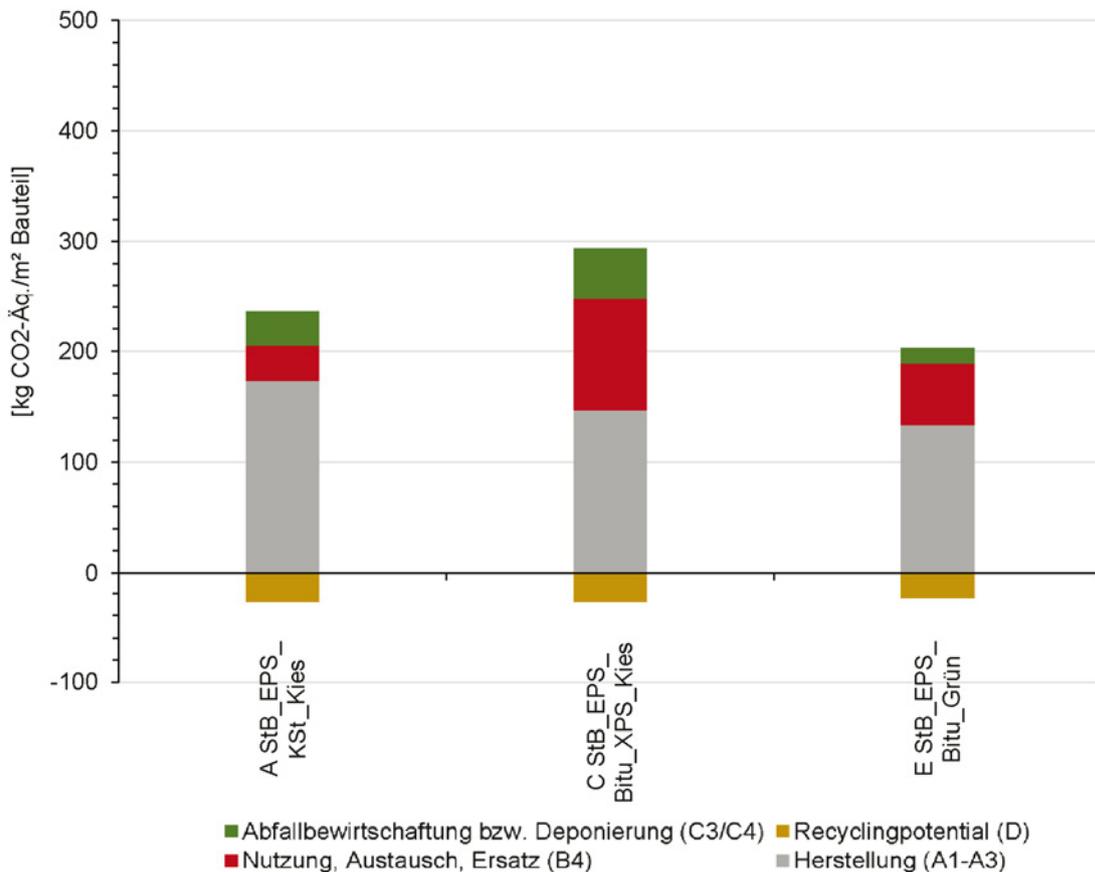


Abbildung 6-23: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 360 (eigene Darstellung)

## 6.5.2 LCC

### 6.5.2.1 Methodische Vorgehensweise

Analog zur LCA erfolgt der Vergleich der detaillierten Berechnung der Projekte A, C und E mit der LCC-Schätzung. Die LCC der Standardaufbauten der KG 300 wird nach

der Barwertmethode für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren durchgeführt. Der Diskontierungszinssatz beträgt 1,5 %, die jährliche Preissteigerung (ab dem zweiten Jahr) 2 %. Im 50. Jahr werden keine Erneuerungs- oder Instandsetzungsinvestitionen mehr vorgenommen. Der Barwert wird als Nettobetrag pro m<sup>2</sup> Bauteil ausgewiesen. Ferner gibt der BNB-Kriteriensteckbrief „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus“ nachfolgende Vorgehensweise für die Kostenermittlung vor:

- Herstellungskosten (A1-A3) (hier: nach der Kostendatenbank der Software Legep)
- Reinigungskosten (B2): Gemittelte Kosten je KG und Oberfläche in €/m<sup>2</sup>a nach (BMUB, 2015a, Anlage 1)
- Inspektion und Wartung (B2): 0,1 % je Herstellkosten pro Jahr nach (BMUB, 2015a, Anlage 2)
- Regelmäßige Instandsetzung (B3): 0,35 % je Herstellkosten pro Jahr nach (BMUB, 2015a, Anlage 2)
- Austausch und Ersatz (B4): Herstellkosten und Entsorgungskosten im Austauschjahr unter Berücksichtigung der Preissteigerung und des Diskontierungszinssatzes nach (BMUB, 2015a, Anlage 4)
- Rückbau und Abbruch (C1): 0,027 €/kg Material; dieser Wert bildet den Durchschnitt der mit Hilfe von Legep berechneten Projektergebnissen ab
- Entsorgung (C3/C4): Entsorgungskosten je €/kg (hier: nach den Legep -Vorgaben):
  - Bauschuttzubereitung (C3): 0,01 €/kg
  - Bauschuttdeponierung (C4): 0,07 €/kg
  - Hausmüllverbrennung (C4): 0,11 €/kg
  - Hausmülldeponierung (C4): 0,25 €/kg
  - Metall-Verwertung (C3): -0,14 €/kg (Gutschrift)

Nach dem BNB-Kriteriensteckbrief werden eigentlich keine Entsorgungskosten berücksichtigt. Hierbei ist lediglich von Rückbaukosten die Rede, was eigentlich der LZPH C1 entspricht. Da im Projekt jedoch der Anspruch erhoben wird, die Ergebnisse der LCA weitestgehend mit denen der LCC vergleichen zu können, werden beim Bauteilvergleich, wie oben erwähnt, Entsorgungskosten nach Legep -Vorgaben ergänzt. Dabei ist zu beachten, dass die Kosten vermutlich nicht allgemeingültig übertragen werden können, da die Werte auf regionalen Recherchen beruhen und innerhalb Deutschlands stark differieren können. Grund dafür ist, dass der Entsorgungsvorgang bisher auf Landkreisebene erfolgt. Das Kalkulationsergebnis kann demnach lediglich einen Orientierungswert darstellen. (Legep, o.J.b)

### 6.5.2.2 Gründung – KG 320

Die Auswertung der Bodenplattenaufbauten der Projekte A, C und E in nachfolgender Abbildung 6-24 zeigt deutlich, dass die Lebenszykluskosten zu mind. 58 % von den Nutzungskosten bestimmt werden, wobei hier vor allem die Reinigungskosten maßgebend sind (Anteil > 33 %).

Der Reinigungsaufwand für Fliesen ergibt sich nach BNB aus der Stärke der Belastung. BNB unterscheidet zwischen normaler und starker Belastung und Belastung von Sanitäreinrichtungen. Je m<sup>2</sup> Fliesenfläche ergeben sich so mittlere Kosten von 6,8 bis 28,33 €/m<sup>2</sup>a. Die hohen Reinigungskosten für Sanitärräume entstehen u.a. durch die

Umlegung der Wandreinigungskosten auf den m<sup>2</sup> Bodenfläche. Da bei der Flächenermittlung der Regelaufbauten nicht zwischen den Belastungszonen der Fliesenböden differenziert wird, wird hier für die Reinigung ein Mittelwert von 14,54 €/m<sup>2</sup>a angesetzt, was die Kosten entsprechend in die Höhe treibt. Im Zuge früher Planungsphasen ist hier eine Unterscheidung zur genaueren Ermittlung der Reinigungskosten sinnvoll.

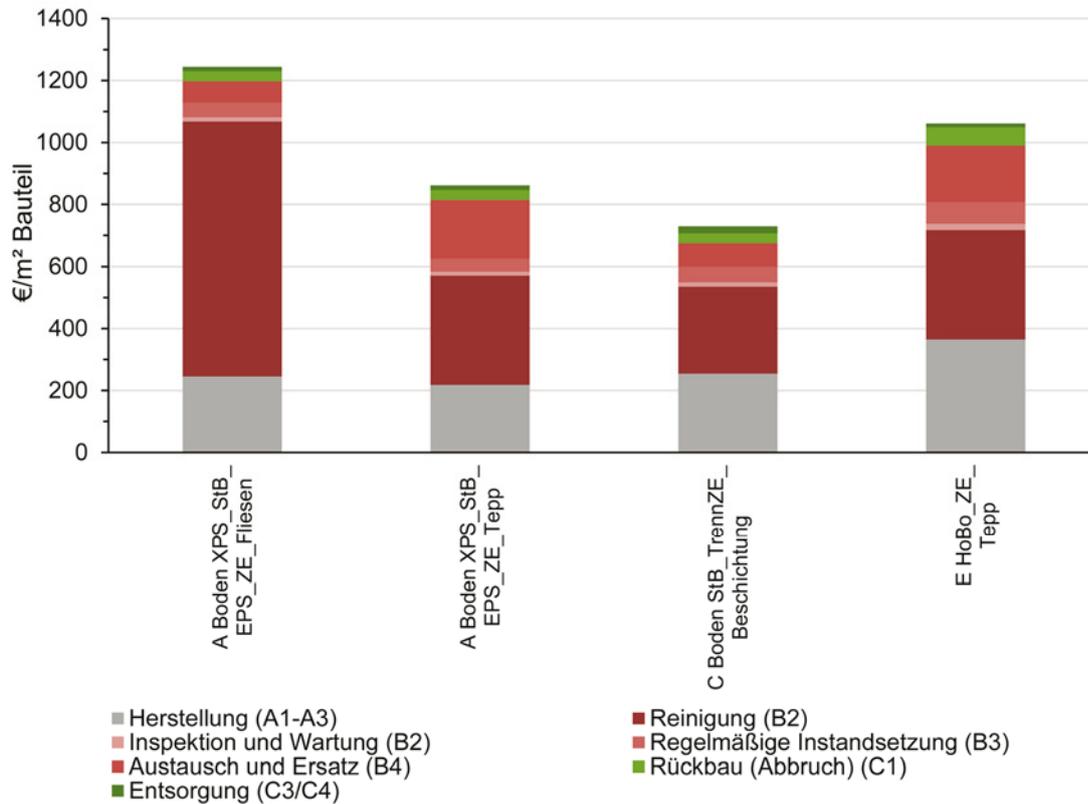


Abbildung 6-24: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 320 (eigene Darstellung)

### 6.5.2.3 Außenwände – KG 330

Die Herstellungskosten der KG 330 je m<sup>2</sup> Bauteil sind im Durchschnitt 53 % höher, als die Herstellungskosten der KG 320. Während des Lebenszyklus von 50 Jahren relativieren sich diese aber, da beispielsweise der Reinigungsaufwand für Außenwände im Gegensatz zu Fußböden relativ gering ist. Für Außenwände mit WDVS (z.B. Projekt C) fallen keine Reinigungskosten an. Hier wird stattdessen die Fassadenfarbe regelmäßiger erneuert (Phase B4).

An Fassaden mit Metallanteil (z.B. Projekt A) kann man in der Entsorgungsphase sogar „verdienen“, wobei sich die Gewinne je m<sup>2</sup> in Grenzen halten (< 9 €/m<sup>2</sup>).

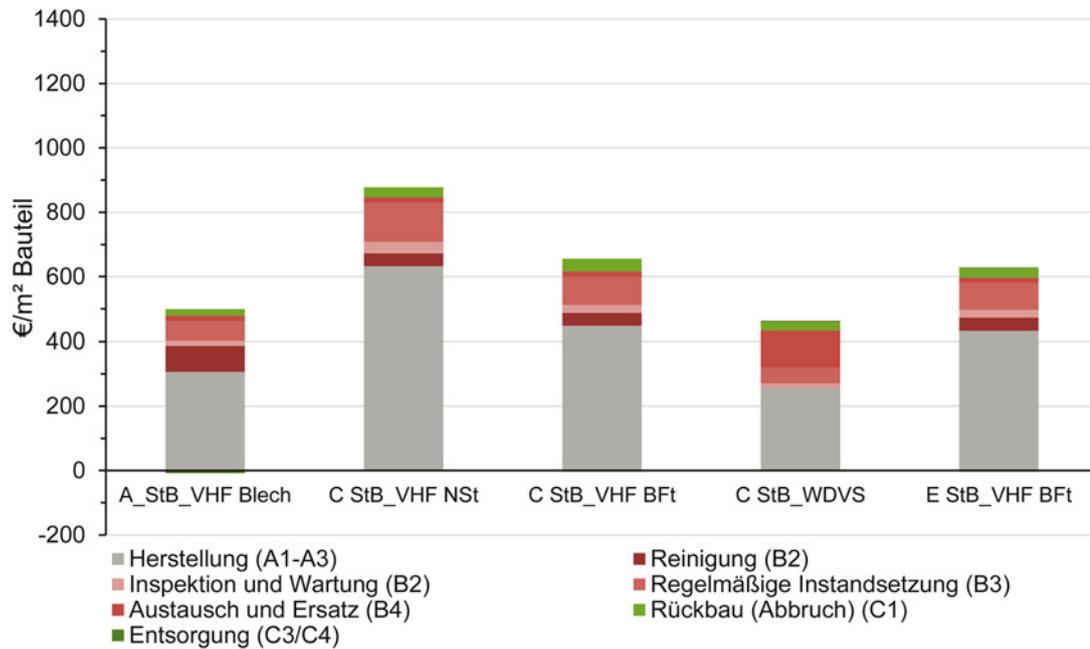


Abbildung 6-25: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 330  
(eigene Darstellung)

#### 6.5.2.4 Fenster – KG 334

Die Herstellungskosten für Fensterelemente schwanken relativ stark:

- Festverglasungen sind billiger als Fenster mit Öffnungsflügeln
- Große Fensterelemente sind im Durchschnitt je m<sup>2</sup> ebenfalls günstiger als kleine
- Dreischeibenverglasungen sind wesentlich teurer als Zweischeibenverglasungen

Der Anteil der Herstellungskosten an den Lebenszykluskosten liegt maximal bei 42 %. Die Reinigungskosten haben mindestens einen Anteil von 16 %. Mehr als bei den anderen Kostengruppen nimmt der Austausch und Fensterersatz (Phase B4) Einfluss: der Anteil an den Lebenszykluskosten beträgt hier mindestens 27 %. Die Kosten der Entsorgungsphase (C-Phasen) sind vernachlässigbar gering (< 1,2 %).

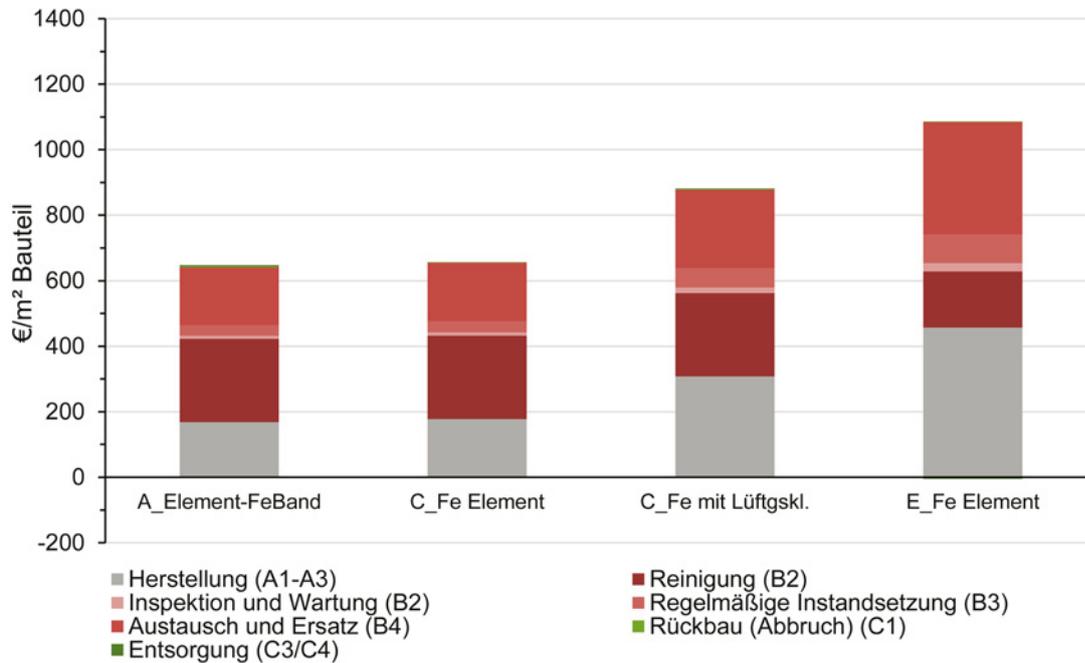


Abbildung 6-26: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 334 (eigene Darstellung)

### 6.5.2.5 Innenwände – KG 340

Im Vergleich zu den anderen Kostengruppen (v.a. KG 320 und KG 350) sind die Innenwände je m<sup>2</sup> Bauteil relativ kostengünstig. Die Herstellungskosten machen dabei mind. 52 % der gesamten Lebenszykluskosten bei den nichttragenden Innenwänden aus, bei den Tragenden sind es mind. 60 %. Wenn es die Statik erlaubt, sollte die Verwendung von Mauerwerkswänden in Betracht gezogen werden, da sie in der Herstellung günstiger als die Stahlbetonwände sind. Bei den tragenden Innenwänden (Mauerwerk und Stahlbeton) fallen auch höhere Rückbaukosten an: der Anteil an den Lebenszykluskosten liegt bei 6 % bis 8 %.

Reinigungskosten werden hier nicht ausgewiesen. Diese werden nach BNB auf den m<sup>2</sup> Bodenfläche umgelegt. Da die Bauteilschichten der Innenwände z.B. keinen Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, ist ihre Nutzungsdauer genauso lang wie die angenommene Lebensdauer des Gebäudes. Deshalb fallen in der Phase B4 nur die Kosten für die Erneuerung der Wandbekleidung (Wandfarbe) zu Buche. In Realität verhält sich dies anders, wenn durch Mieterwechsel konstruktiv intakte, nichttragende Innenwände während der Gebäudelebensdauer mehrmals ausgetauscht bzw. ersetzt werden (vgl. Kapitel 6.2.4).

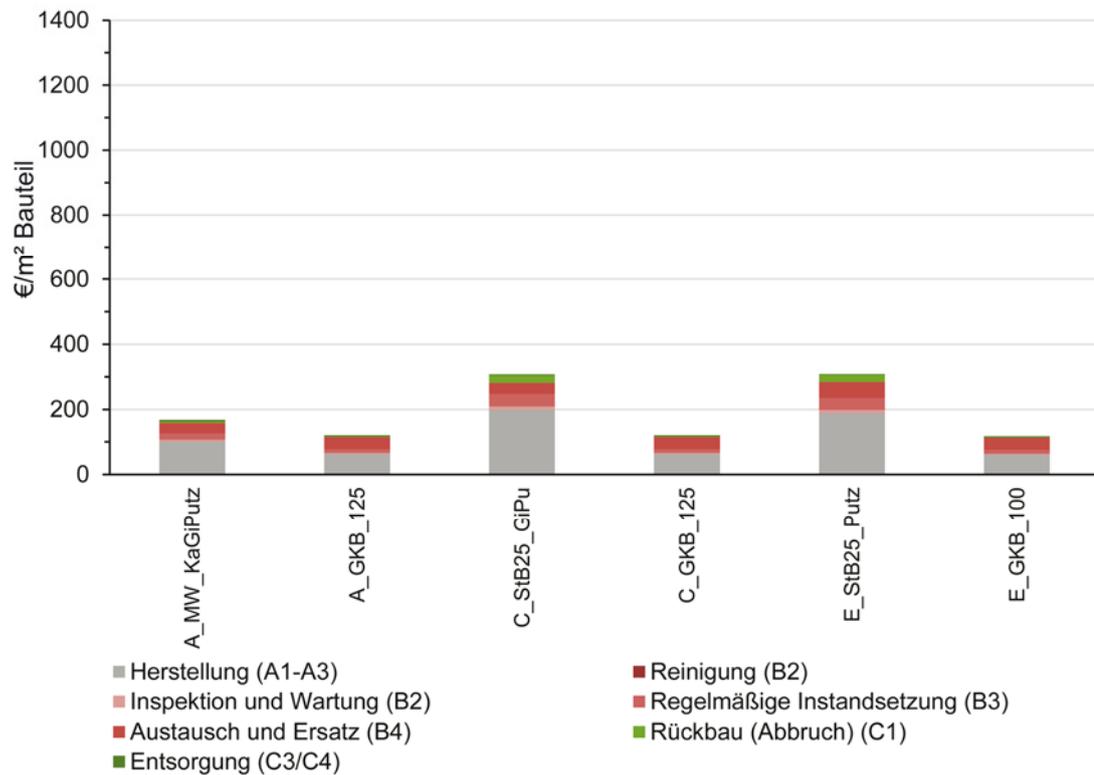


Abbildung 6-27: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 340 (eigene Darstellung)

#### 6.5.2.6 Decken – KG 350

Neben der KG 320 nehmen die Reinigungskosten auch bei den Geschossdecken einen signifikanten Einfluss (30 bis 63 %). Wie bereits erwähnt, bedingt hier die Art der Beanspruchung und die Umlegung der Wandreinigungskosten auf die Bodenfläche die Höhe der Kosten. 57 bis 74 % der Lebenszykluskosten entfallen insgesamt auf die Nutzungsphase, nur 4 bis 6 % auf die Entsorgungsphase. Die Nutzungskosten können etwas reduziert werden, indem Fußbodenbeläge länger genutzt werden. Deshalb sollten Beläge nutzungsgerecht eingesetzt und auf Qualitätsstandards geachtet werden.

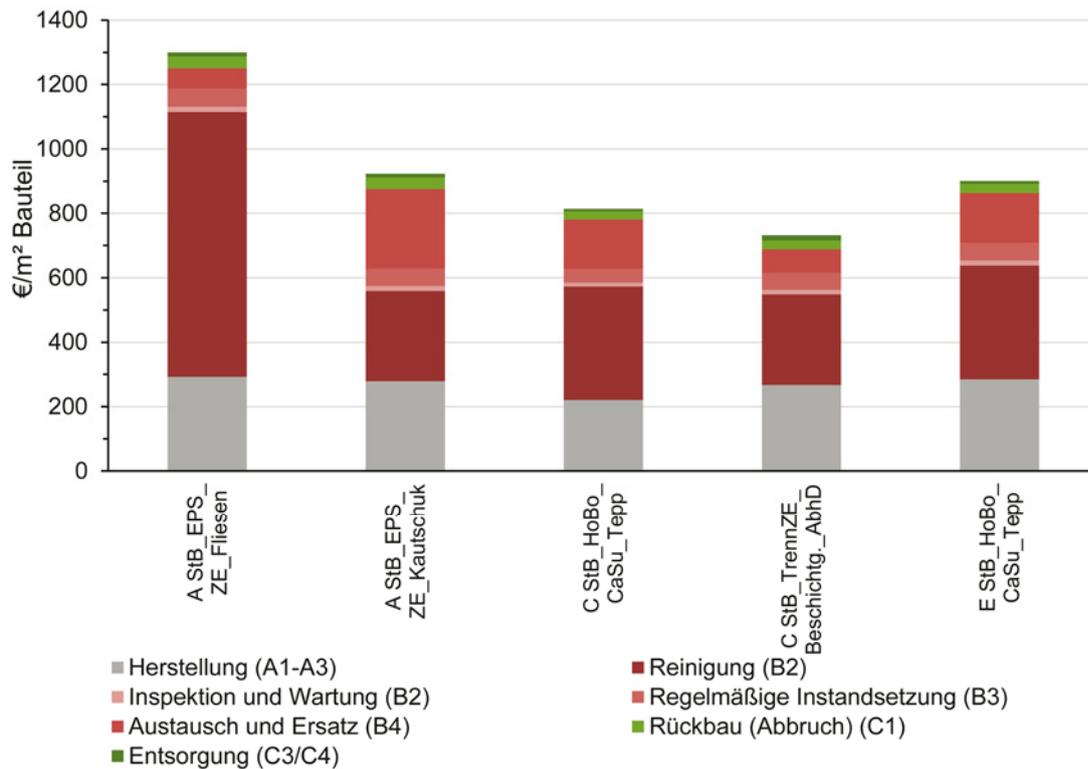


Abbildung 6-28: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 350 (eigene Darstellung)

### 6.5.2.7 Dächer – KG 360

Die Dachdecken werden zu 53 bis 64 % von den Herstellungskosten bestimmt. Neben den pauschalen Kostenannahmen für regelmäßige Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen fallen auf den Austausch und Ersatz von Bauteilschichten 13 bis 27 % der gesamten Lebenszykluskosten, wobei diese durch die Ausführung der Dachabdichtung wesentlich beeinflusst werden.

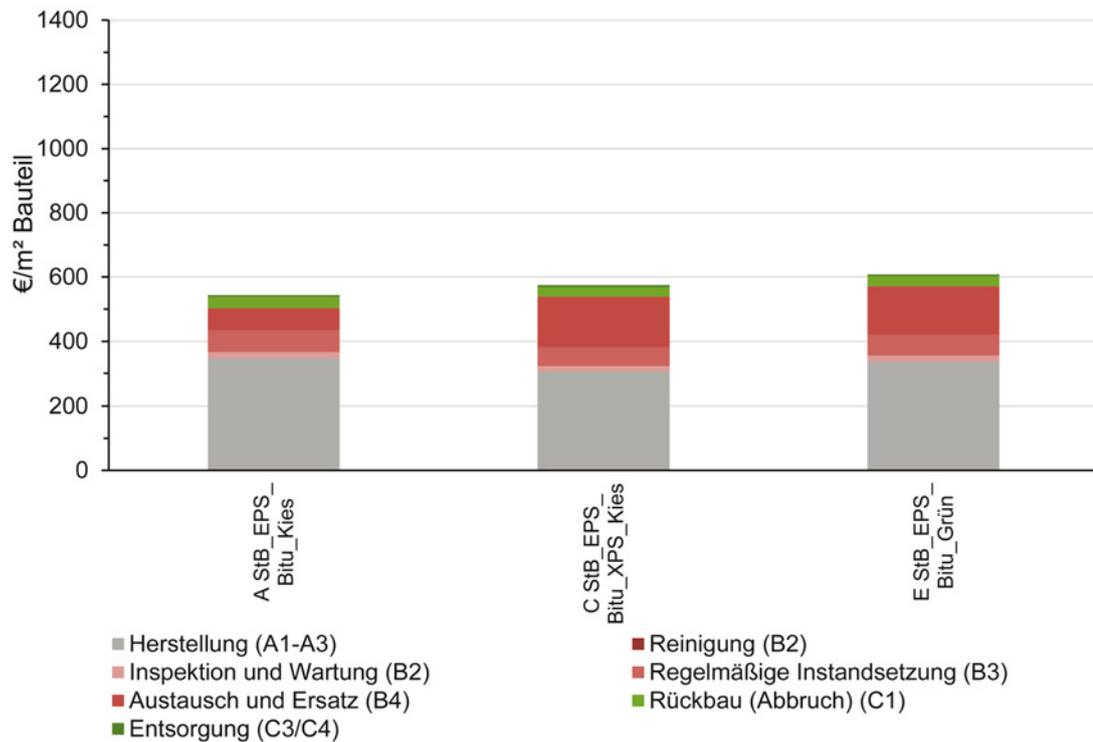


Abbildung 6-29: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 360 (eigene Darstellung)

## 6.6 Fazit

Die Ergebnisse der LCA und LCC zu beeinflussen ist ein komplexer, ineinandergreifender Prozess, wobei folgende Faktoren zusammenfassend festgehalten werden können.

### 6.6.1 Fazit LCA

- Das **Tragwerk** ist über alle Kategorien und Szenarien hinweg ein wesentlicher Treiber; hier gilt es unabhängig von Lebens- und Nutzungsdauern sowie Gebäudegeometrie ökologischere Tragkonstruktionen zu verwenden bzw. massive Konstruktionen auf ein Minimum zu beschränken; jedoch können die Auswirkungen pro Jahr auch wesentlich verringert werden, wenn eine möglichst lange Lebensdauer ( $\geq 80$  Jahre) gewählt wird. Forciert werden kann dies durch einen anpassungsfähigen Grundriss, der einen Gebäudeabriss auf Grund von Nutzungsänderungen entbehrlich macht.
- Bei kleinen, v.a. eingeschossigen Bürogebäuden rücken die Kategorien „**Fassade**“ und „**Dämmung/Abdichtung**“ auf Grund der höheren Flächenanteile in den Optimierungsbereich. Auch hier sollte dann besonders auf längere Nutzungszyklen und ökologischere Materialien geachtet werden.
- Auch der **Innenausbau** nimmt über alle Szenarien hinweg einen gleichbleibenden und deutlichen Einfluss. Dies ändert sich auch nicht bei der Veränderung der Gebäudegeometrie. Hier werden neben der Verlängerung der Ge-

bäudelebensdauer auch eine Erhöhung der Nutzungsdauer der Bauteilschichten und die Verwendung grundsätzlich ökologischer Baumaterialien empfohlen.

- **Fenster und Türen** nehmen 8 bis 15 % Einfluss an den Einzelergebnissen der Umweltwirkungen bzw. am nichterneuerbaren Primärenergiebedarf. Der Einfluss und das Optimierungspotential verhalten sich analog zu dem der Fassade;
- Die funktionale Kategorie „**Sonstiges**“ scheint zwar spezifisch gesehen grundsätzlich wenig Einfluss zu nehmen, jedoch muss beachtet werden, dass der Flächenanteil gering ist. Hier gilt es ebenfalls, robustere Materialien oder Konstruktionen vorzusehen, die bestenfalls gleichzeitig geringere ökologische Auswirkungen besitzen.

### 6.6.2 Fazit LCC

- Reinigungskosten nehmen im Laufe der Lebensdauer bei Bodenplatten und Geschossdecken einen signifikanten Einfluss. Diese Kosten, welche dem **Innenausbau** zugewiesen werden, können verringert werden, wenn man die Fußbodenoberflächen nutzungsgerecht plant und nach Robustheit auswählt. So verhindert man unnötig hohe Reinigungskosten und häufige Austauschzyklen. Bei der Variation der Betrachtungszeiträume fällt auf, dass sich die Betrachtungszeit kaum auf die jährliche Belastung auswirkt. Ein vorzeitiger Mieterwechsel mit einer Kompletterneuerung des Innenausbau nach 30 Jahren ohne Berücksichtigung der einzelnen Bauteilnutzungsdauern geht mit einer Erhöhung der LZK um ca. 30 % einher.
- Kosten für **Fenster und Türen** können reduziert werden, wenn bei gleichem Fensterflächenanteil weniger Öffnungsflügel geplant werden. Festverglasungen sind in der Herstellung grundsätzlich kostengünstiger. Die Mehrkosten für Dreifachverglasungen sollten mit den Heizkosteneinsparungen verglichen werden. Witterungsbeständige oder renovierungsfähige Fensterrahmen verhindern Mehrkosten durch den Austausch und Ersatz.
- Verputzte **Fassaden** benötigen keine Reinigung. Ziel sollte es sein, die Fassadenaufbauten so zu planen, dass sie sortenrein entsorgt bzw. recycelt werden können. Vor allem bei hohen Metallanteilen kann man so etwas Geld in der Entsorgungsphase zurückerhalten. Zunächst erhöht sich die jährliche Kostenbelastung, wenn die Lebensdauer der Fassade bzw. des Gebäudes verringert wird. Erhöht man die Lebensdauer des Gebäudes auf 80 Jahre und behält die standardmäßigen Austauschzyklen und Instandhaltungskosten hat dies jedoch keine signifikant positiven Auswirkungen auf die jährliche Belastung.
- Die Kosten für das **Tragwerk** fallen hauptsächlich in der Erstellung an. Falls statisch realisierbar, sollten Skelettbauweisen Schottenbauweisen vorgezogen werden. Die so eingesparten Materialmassen reduzieren gleichzeitig die Kosten in der Herstellung und Entsorgung. Mit steigender Lebensdauer des Gebäudes sinkt die jährliche Belastung durch die Investitions- und Nutzungskosten. Deswegen sollte auf langlebige Konstruktionen geachtet werden, die im Rahmen von Umbauprozessen weitergenutzt werden können. Bei Gebäu-

den mit einer kürzeren Lebensdauer sollte auf die Rückbaubarkeit des Gebäudes geachtet werden, sodass eine Wieder- bzw. Weiterverwendung der einzelnen Materialien gewährleistet werden kann.

- Die Kosten für den Austausch und Ersatz von **Dämmungen/Abdichtungen** während der Lebensdauer eines Gebäudes belaufen sich ca. auf die Herstellungskosten. Bessere Abdichtungs- und witterungsbeständigere Dämmmaterialien verhindern dies.
- Betrachtet man das Gebäude als Gesamtsystem und nicht in den einzelnen funktionalen Kategorien, haben unterschiedliche Lebensdauern keinen Einfluss auf die jährliche Kostenbelastung. Bei kürzeren Lebensdauern gleichen sich die geringeren Nutzungskosten mit den höheren Investitionskosten aus. Wenn die Investitionskosten jährlich verrechnet werden, erhöhten sich diese bei einer Lebensdauer von 30 Jahren gegenüber einer Lebensdauer von 50 Jahren um ca. 70 %. Vergleicht man die Nutzungskosten bei 30 und 50 Jahren in den einzelnen funktionalen Kategorien, weisen diese starke Unterschiede auf. Die jährlichen Nutzungskosten variieren dann zwischen ca. 25 % und ca. 100 %. Das Tragwerk und die Fassade weisen sowohl bei 30 Jahren als auch bei 50 Jahren nahezu die gleichen jährlichen Nutzungskosten auf, da sie im Wesentlichen durch regelmäßige Nutzungskosten und nicht durch unregelmäßige Austauschzyklen beeinflusst werden. In den anderen funktionalen Kategorien können hohe Nutzungskosten eingespart werden, da innerhalb von 30 Jahren weniger Bauteile ersetzt werden müssen als in 50 Jahren.



## 7 Entwicklung einer Strategie für frühe Planungsphasen

Die Analyse der Signifikanz der funktionalen Kategorien für LCC und LCA der Beispielprojekte gibt Hinweise darauf, welche Parameter in frühen Planungsphasen einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtbilanz des Projektes nehmen. Diese Parameter können auch als strategisch bezeichnet werden, wenn sie während der Planung entscheidend beeinflusst werden (vgl. Kapitel 1.1.3). In der nachfolgenden Darstellung wird der betriebliche Energieeinsatz nicht dargestellt, obwohl er den größten Einfluss auf die Umweltwirkungen nimmt und auch bei den Lebenszykluskosten einen nicht unerheblichen Anteil hat. Zum einen wird hier der Fokus auf die verbauten Materialien und Komponenten der KG 300 und 400 gelegt. Zum anderen können beim betrieblichen Energieeinsatz als wesentliche Stellschraube sofort der gewählte Energiestandard und die Energieversorgung identifiziert werden.

### 7.1 Anteil der funktionalen Kategorien an der Gesamtbilanz

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen übersichtlich die maßgebenden Treiber der Lebenszykluskosten und, stellvertretend für die LCA, die Treiber der Umweltkosten (Eco-Costs) und des GWP. Die Zuordnung erfolgt je funktionaler Kategorie und nach Lebenszyklusphasen. So ist der Anteil der einzelnen Lebenszyklusphasen an den Kennwerten je funktionaler Kategorie ablesbar. Auf diese Weise werden Treiber, wie verschiedene Materialien, Bauteilaufbauten oder Austauschraten schnell identifiziert.

Die Diagramme der Anteile der Lebenszyklusphasen zeigen jeweils den Durchschnitt der fünf Beispielprojekte, während nebenstehend die Durchschnittswerte und Maximal- und Minimalwerte dargestellt sind.

Die daraus und aus den vorangegangenen und folgenden Variantenstudien entwickelten Strategien sind in den Kapiteln 7.4 und 7.5 dargestellt.

Das Tragwerk ist der wesentliche Treiber der Umweltwirkungen der Baukonstruktion (KG 300), der in frühen Planungsphasen durch Materialwahl und Wahl des Tragsystems gesteuert werden kann. Zweitgrößter Treiber ist der Innenausbau.

Auf die Lebenszykluskosten nimmt der Innenausbau sogar mehr Einfluss als das Tragwerk, das an zweiter Stelle folgt.

Nach dem Tragwerk und Innenausbau ist die Kategorie „Dämmung, Abdichtung Dach und Fundament“ der drittgrößte Treiber der Konstruktion, dessen Einfluss im Wesentlichen über die Materialwahl und die Austauschzyklen bestimmt wird.

Auffällig ist die unterschiedliche Verteilung der Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen über den Lebenszyklus hinweg. Die Nutzungsphase (B2+B3+B4, also ohne Betrieb) verursacht in allen Kategorien außer beim Tragwerk und der Fassade über die Hälfte der Lebenszykluskosten aufgrund von Reinigung und Austausch. Hinsichtlich der LCA verursacht die Nutzungsphase (B4) nur in der Kategorie Sonstiges, die insgesamt nur wenig zu Buche schlägt, über die Hälfte von Treibhauspotenzial und Eco-Costs.

## Einfluss LEBENSZYKLUSKOSTEN

(Nutzungsdauer 50a – Standardaustauschzyklen; ohne betrieblichen Energieeinsatz)

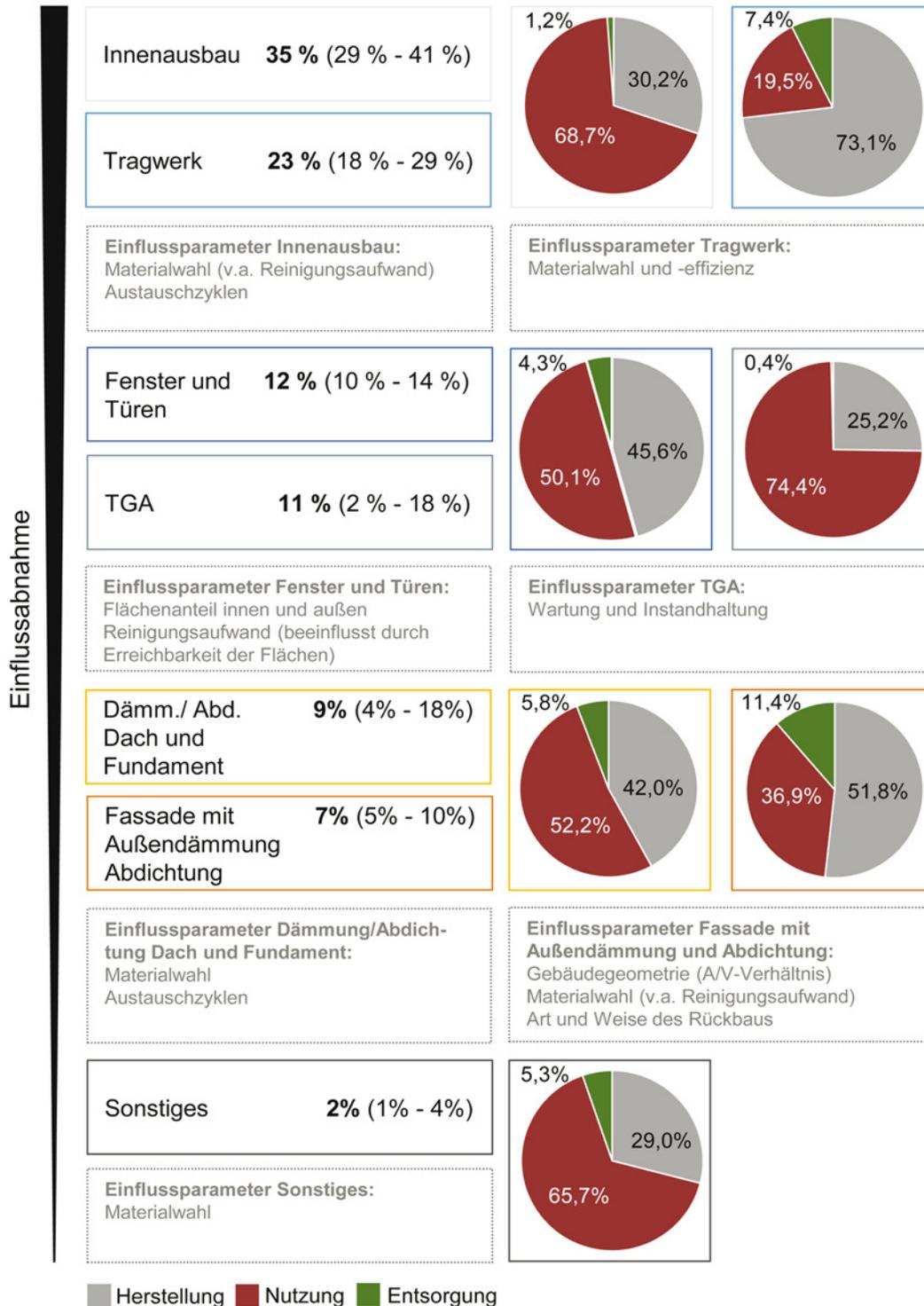


Abbildung 7-1: Strategische Parameter Lebenszykluskosten (LCC) – Darstellung der Projektergebnisse (eigene Darstellung)

## Einfluss UMWELTKOSTEN (Eco-Costs)

(Nutzungsdauer 50a – Standardaustauschzyklen; ohne betrieblichen Energieeinsatz)

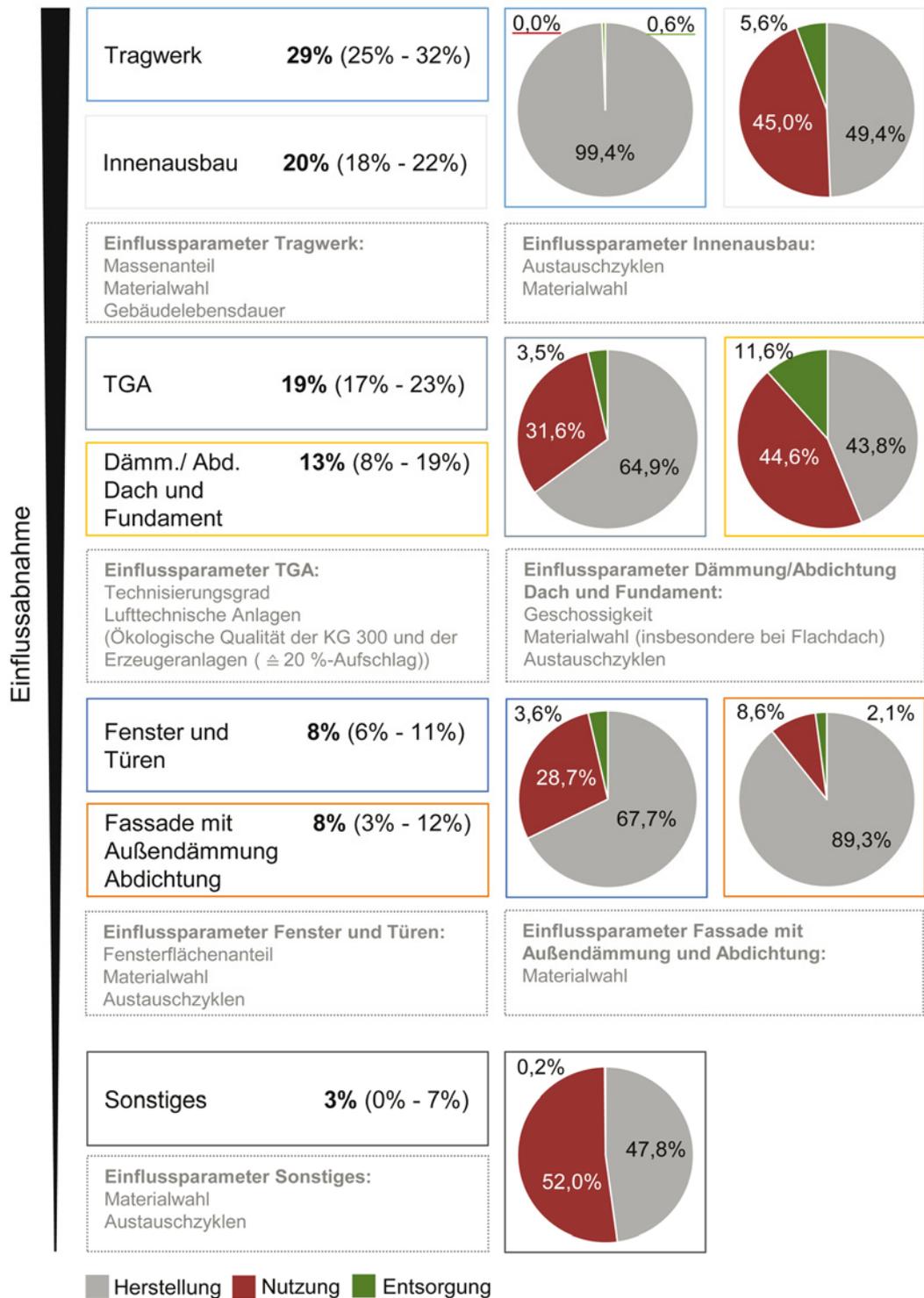


Abbildung 7-2: Strategische Parameter Umweltkosten (Eco-Costs) – Darstellung der Projektergebnisse (eigene Darstellung)

Die relativ geringen Unterschiede zwischen den Anteilen einzelner Kategorien am GWP bzw. an den Eco-Costs ergeben sich fast ausschließlich aus der Wirkungskategorie AP (Versauerungspotenzial) und dem Indikator PENRM (nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung) (siehe Kapitel 5.3). Die Treiber der Eco-Costs sind im Wesentlichen die gleichen Treiber wie für das GWP.

# Einfluss ÖKOBILANZ – GWP

(Nutzungsdauer 50a – Standardaustauschzyklen; ohne betrieblichen Energieeinsatz)

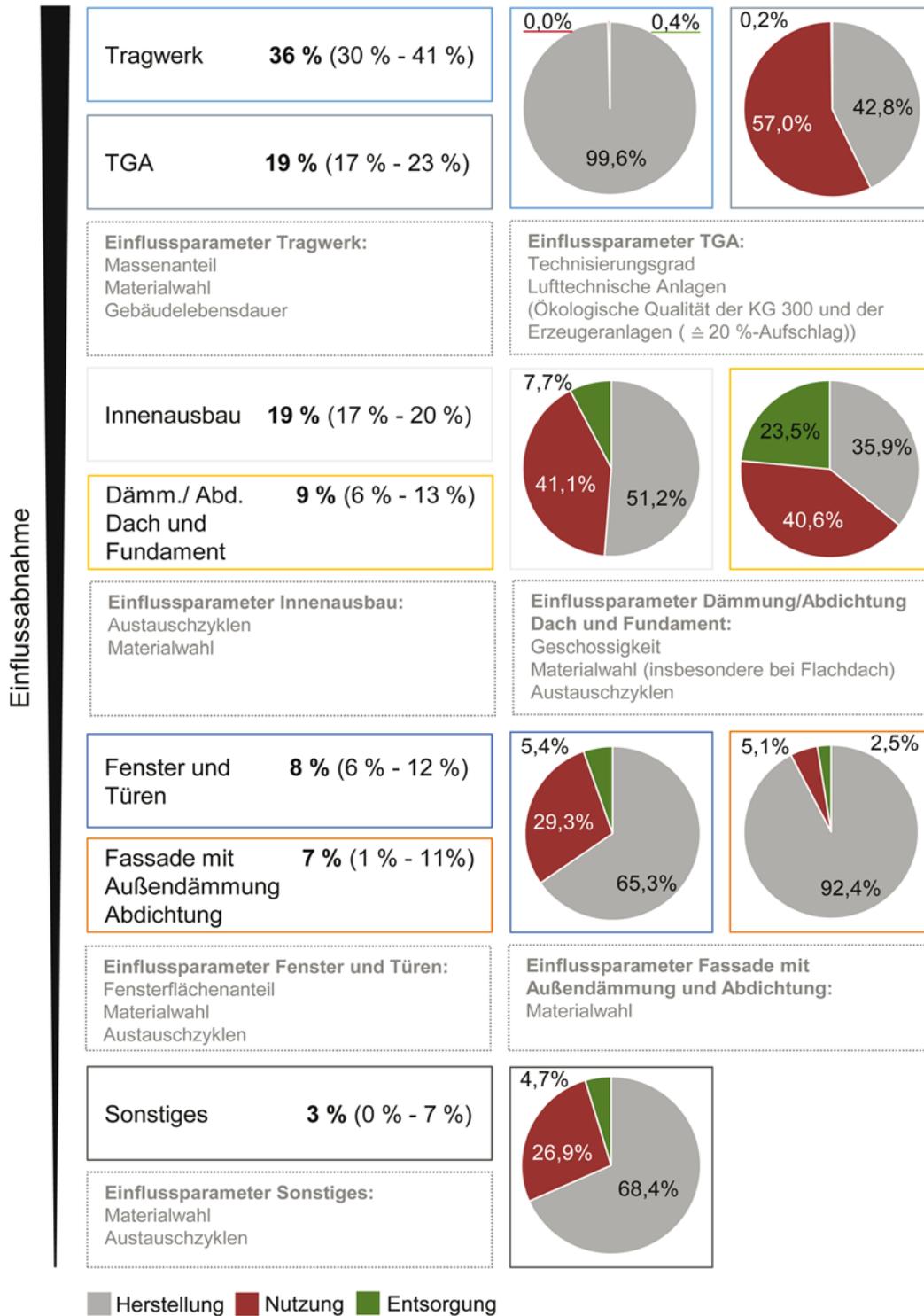


Abbildung 7-3: Strategische Parameter Treibhauspotenzial – Darstellung der Projektergebnisse (eigene Darstellung)

## 7.2 Methodik zur Hochrechnung der KG 300

Es wird angenommen, dass mit Hilfe von stark vereinfachten Hochrechnungen vergleichende Aussagen über die ökologische und ökonomische Qualität eines Gebäudeentwurfes gemacht werden können. Dies wird anhand der Beispielgebäude überprüft. Dabei werden nur die in Kap. 6.5 identifizierten Standardaufbauten der KG 320 bis 360 jedes Projektes verwendet. Die Hochrechnung erfolgt demnach nur mit sechs bis neun Bauteilen pro Projekt. Anschließend werden die vereinfachten Hochrechnungen der in Kap. 5.1.1 erstellten ausführlichen Erhebung des jeweiligen Projektes gegenübergestellt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu prüfen. Diese Untersuchung wird eingeschränkt auf die Projekte A, C und E, die ein Spektrum unterschiedlicher Typologien hinsichtlich Größe, Kubatur und Geschossigkeit repräsentieren. Diese Projekte bilden gängige Konstruktionsprinzipien ab und besitzen eine Architektur, die sich in überschlägige Massenermittlungen gut abbilden lässt und so eine transparente Validierung der Hochrechnungsmethode erlauben.

Wenn sich diese Methode als belastbar erweist, sind damit bereits in frühen Entwurfsphasen vergleichende Variantenbetrachtungen möglich: Benötigt werden lediglich die Regelaufbauten und die zugehörigen Flächenkennzahlen (Bauteile pro KG 2. Ebene). Letztere sind bereits früh im Planungsprozess anhand von Entwurfsständen oder -varianten ermittelbar. Ebenso bestehen in der Regel bereits früh planerische Vorstellungen ihres prinzipiellen Schichtaufbaus. So können Entwurfsvarianten z.B. hinsichtlich Kubatur oder Materialität überprüft und mittels Differenzbetrachtungen optimiert werden.

Indem sich die Hochrechnung auf die Regelbauteile beschränkt, führt sie zu einer Vereinfachung, die einige Bauteile und Detaillierungen vernachlässigt. Daher ist zu erwarten, dass sie geringer ausfällt als die ausführliche Ermittlung. Nicht berücksichtigte bzw. übermessen werden beispielsweise folgende Kostengruppen:

- KG 338: Sonnenschutz
- KG 339 und 349: Geländer, Handläufe, etc.
- KG 344: Innentüren und zugehörige Wandöffnungen
- KG 346: Elementierte Innenwände, Glasinnenwände
- KG 369: Geländer, Schutzgitter, Schneefänge, etc.

Auch die Vielfalt von Wand- und Bodenbelägen innerhalb eines Gebäudes kann durch die Regelaufbauten nicht erfasst werden. Ebenso bleiben aufwendige Detailausführungen unberücksichtigt. So wird beispielsweise bei KG 330 die Fassade eines Gebäudeentwurfs nur über die m<sup>2</sup> Wandfläche gerechnet, abzüglich der Wandöffnungen. Materialintensive Details, wie eine Naturstein-Verkleidung die dreiseitig um die Fensterlaibung herumgeführt ist, werden nicht mitbilanziert. Gleiches gilt für aufwendige Sockel- und Dachanschlüsse.

Gegebenenfalls müsste die Methode hier individuell verfeinert werden, wenn ein bestimmtes Detail entwurfsbestimmend ist und in hoher Quantität im Projekt auftritt, damit es sich angemessen in der Bilanz widerspiegelt und ebenfalls Gegenstand der Optimierung werden kann.

### 7.2.1 Gegenüberstellung LCA

Entsprechend dem Kap. 6.5 wird die Untersuchung hier auf das Treibhauspotential (GWP) der KG 300 eingeschränkt. Für jedes der drei Projekte wird das GWP überschlägig anhand der Regelbauteile und deren Flächenverteilung hochgerechnet. Das erzielte Ergebnis wird dem der ausführlichen Ermittlung gegenübergestellt.

Innerhalb der einzelnen Projekte A, C und E bewegt sich die gesamte Abweichung zwischen Hochrechnung und Ermittlung bei  $10 \pm 2 \%$ , siehe Tabelle 7-1. Über die Kostengruppen hinweg ist also eine Tendenz zu einer moderaten Unterschreitung erkennbar. In den einzelnen Kostengruppen hingegen ist die Spreizung teilweise deutlich höher. Sie beträgt im Einzelfall bis zu 37,8 % (Projekt A, KG 340).

Tabelle 7-1: Prozentuale Abweichungen der Hochrechnung von der Ermittlung der LCA je Kostengruppe (eigene Darstellung)

Kosten- gruppe	Projekt A		Projekt C		Projekt E		Ø der Ab- weichun- gen
	Ermitt- lung	Hoch- rechnung	Ermitt- lung	Hoch- rechnung	Ermitt- lung	Hoch- rechnung	
KG 320	100 %	85,7 %	100 %	80,5 %	100 %	105,1 %	-9,6 %
KG 330	100 %	108,1 %	100 %	78,1 %	100 %	72,7 %	-13,7 %
KG 340	100 %	62,2 %	100 %	86,1 %	100 %	74,3 %	-25,8 %
KG 350	100 %	88,2 %	100 %	96,4 %	100 %	110,6 %	-1,6 %
KG 360	100 %	102,5 %	100 %	98,6 %	100 %	107,3 %	-2,8 %
<b>Gesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>92,0 %</b>	<b>100 %</b>	<b>87,8 %</b>	<b>100 %</b>	<b>91,6 %</b>	<b>-10,7 %</b>

In den meisten Fällen unterschreitet die Hochrechnung die Ermittlung, was sich im Wesentlichen aus den unter 7.2 genannten Vereinfachungen begründet. Es ergeben sich jedoch auch Überschreitungen. Diese entstehen aus folgenden Ursachen:

- Durch die Reduzierung auf wenige Regelaufbauten wirken sich einzelne treibend wirkende Materialien oder Bauteilschichten überproportional aus. Dies zeigt sich z.B. bei Bodenbelägen in Projekt E (KG 320 und 350): Der Teppichbodenbelag des Regelbauteils weist bereits in der Herstellungsphase ein vergleichsweise hohes GWP auf, das er zusätzlich noch durch kurze Instandhaltungszyklen mehrt. Eine differenzierte Flächenberechnung hingegen würde zeigen, dass Teppich nur für ca. 35 % der Bodenflächen zum Einsatz kommt. Die verbleibenden 65 % der Flächen von KG 320 und 350 haben eine Vielzahl anderer Bodenbeläge mit kleineren relativen Flächenanteilen. Deshalb findet eine Verzerrung statt, der Teppich schlägt sich überproportional nieder und treibt das GWP in die Höhe.

Ein ähnlicher Effekt entsteht bspw. durch eine abgehängte Decke in Projekt E, KG 360: Das Regelbauteil sieht eine abgehängte Decke vor. Tatsächlich tritt sie jedoch nicht überall auf, und hat dadurch einen deutlich geringeren Flächenanteil im Projekt.

Diesen Verzerrungen könnte durch eine prozentuelle Anpassung der Regelbauteile begegnet werden. Beispielsweise könnte im Regelbauteil für 1,0 m<sup>2</sup> Deckenfläche nur 0,8 m<sup>2</sup> Abhangdecke angesetzt werden. Auch die Flächenanteile verschiedener Bodenbeläge könnten sich proportional im Regelbauteil abbilden lassen. In dem Maße wie Erkenntnisse im Planungsfortschritt gewonnen werden, könnte dies mitgeführt werden.

- Es besteht eine gewisse Varianz in der Eingabe von Bauteilen. Beispielsweise ist in Projekt A in der KG 330 die Fassadenbekleidung und Fassadenunterkonstruktion abweichend von der ausführlichen Ermittlung bilanziert. Dies begründet sich auch durch nicht eindeutig zuzuordnende Datensätze der Ökobaudat. Hier sind durch den Planer Annahmen, zum Beispiel zu Materialstärken oder genauen Materialarten zu treffen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse innerhalb der drei Projekte (Abbildung 7-4 bis Abbildung 7-6) weist darauf hin, dass auch mit überschlägigen Hochrechnungen bereits eine Tendenz des lebenszyklusbasierten Treibhauspotentials erkennbar ist. Daher wird die Methode für eine Differenzbetrachtung des Fallbeispiels (s. Kap. 7.3) als geeignet angesehen.

Perspektivisch kann aus der Auswertung zahlreicher weiterer Projekte das Spektrum der Abweichungen zunehmend geschärft werden, bzw. ein bspw. kostengruppenabhängiger Prozentsatz der typischen Über-/ oder Unterschreitungen ermittelt werden.

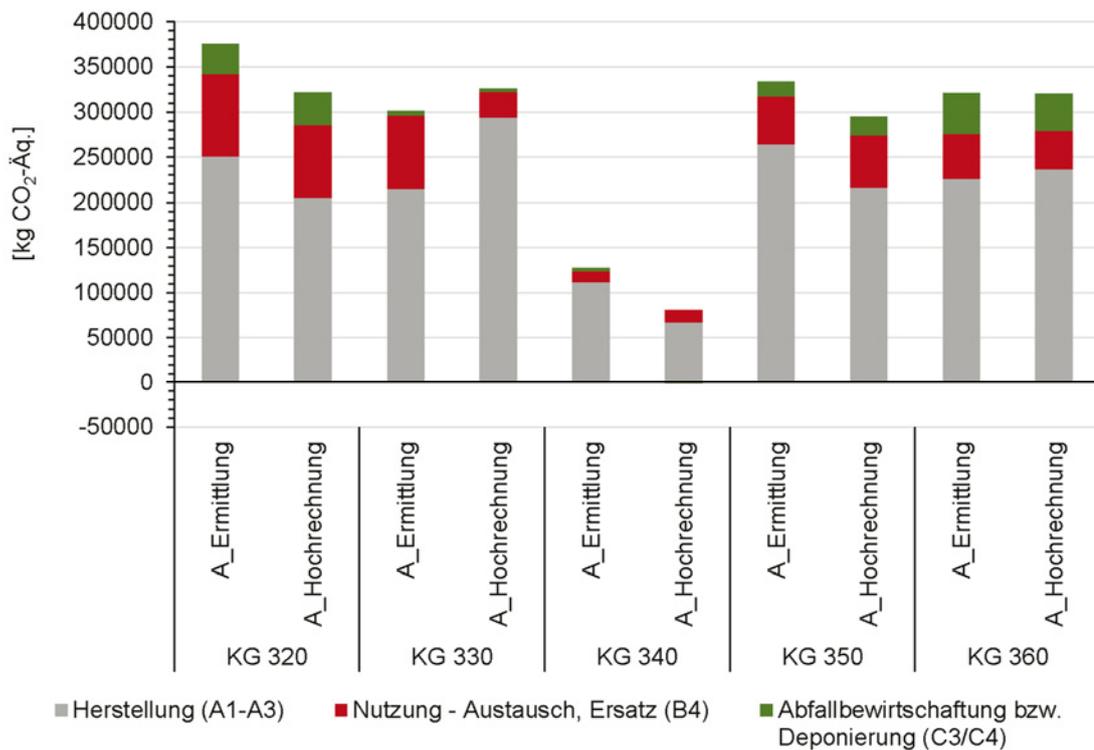


Abbildung 7-4: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung des GWP nach Kostengruppen, Projekt A (eigene Darstellung)

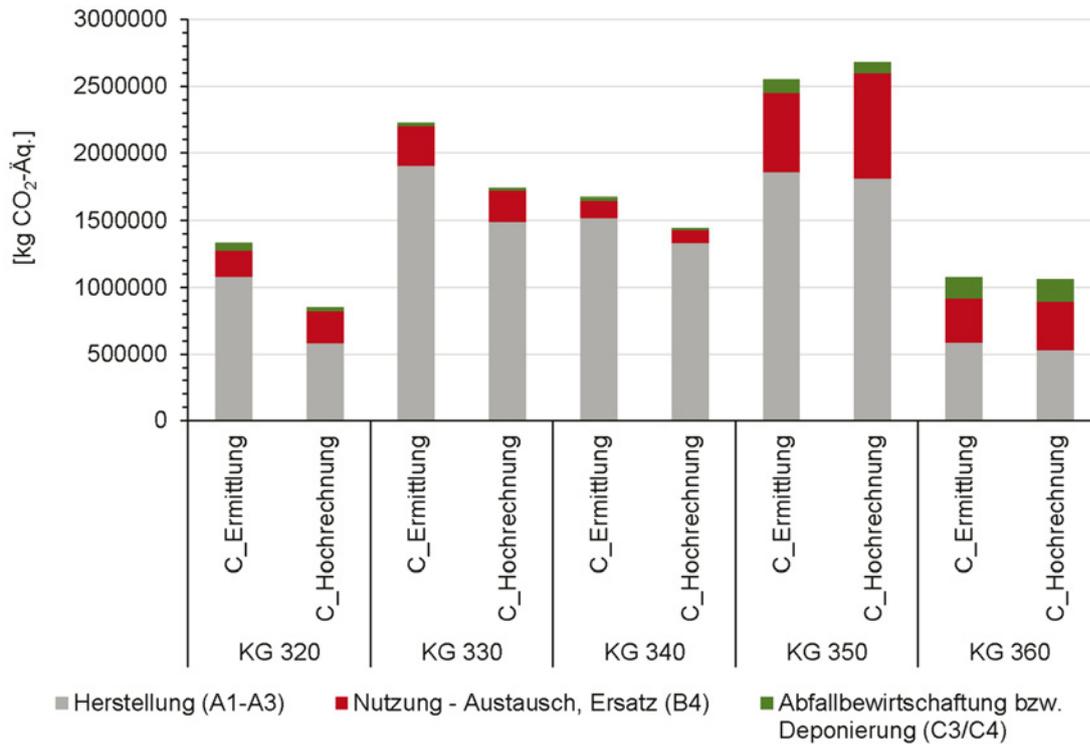


Abbildung 7-5: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung des GWP nach Kostengruppen, Projekt C (eigene Darstellung)

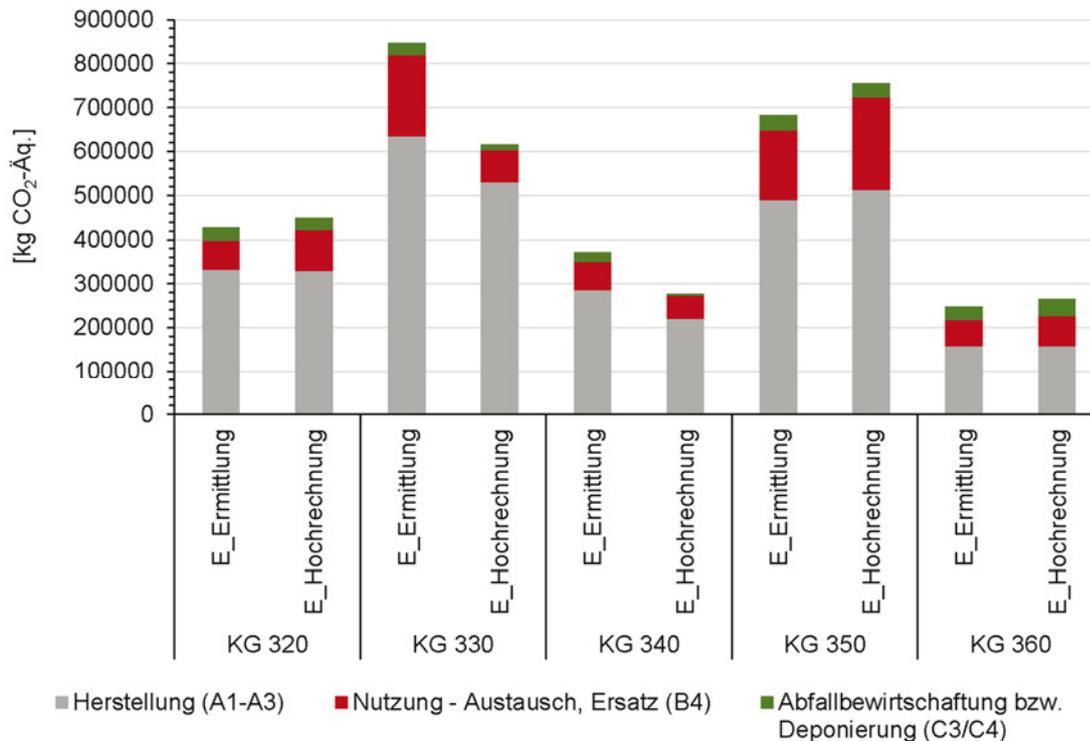


Abbildung 7-6: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung des GWP nach Kostengruppen, Projekt E (eigene Darstellung)

## 7.2.2 Gegenüberstellung LCC

Analog zur Hochrechnung der Umweltwirkungen der KG 300 wird eine Hochrechnung der Lebenszykluskosten für die Projekte A, C und E durchgeführt (siehe Abbildung 7-7 bis Abbildung 7-9). Die vereinfachten Annahmen zu Bauteilschichten und Flächenanteilen verursachen natürlich Abweichungen zwischen Ermittlung und Hochrechnung. Nach HOAI §2 Abs. 10 ist die Kostenschätzung die überschlägige Ermittlung der Kosten auf Grundlage der Vorplanung (LPH 2), welche Vorplanungsergebnisse und Mengenschätzungen umfasst. Abweichungen zwischen Kostenschätzungen, -berechnungen und tatsächlichen Kosten sind also systemimmanent.

Die Abweichungen zwischen Lebenszykluskostenermittlung und -hochrechnungen der Projekte A, C und E liegen bei  $23 \pm 7 \%$ . Die Abweichungen in den einzelnen Kostengruppen KG 320 bis KG 360 sind teilweise relativ hoch: z.B.  $-48 \%$  bei der KG 340 (vgl. nachfolgende Tabelle).

Tabelle 7-2: Prozentuale Abweichungen der Hochrechnung von der Ermittlung der LZK je Kostengruppe (eigene Darstellung)

Kos- ten- gruppe	Projekt A		Projekt C		Projekt E		Ø der Ab- weichun- gen
	Ermitt- lung	Hoch- rechnung	Ermitt- lung	Hoch- rechnung	Ermitt- lung	Hoch- rechnung	
KG 320	100 %	130,0 %	100 %	67,3 %	100 %	95,2 %	-2,5 %
KG 330	100 %	69,6 %	100 %	76,2 %	100 %	92,7 %	-20,5 %
KG 340	100 %	47,4 %	100 %	62,7 %	100 %	45,9 %	-48,0 %
KG 350	100 %	86,9 %	100 %	84,3 %	100 %	88,3 %	-13,5 %
KG 360	100 %	72,9 %	100 %	65,9 %	100 %	67,8 %	-31,1 %
<b>Gesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>84,0 %</b>	<b>100 %</b>	<b>70,9 %</b>	<b>100 %</b>	<b>76,0 %</b>	<b>-23,1 %</b>

Diese und weitere Abweichungen sind durch folgende Annahmen bzw. fehlende Bauteilbilanzierungen begründet:

- Die funktionale Kategorie „Sonstiges“ (z.B. Sonnenschutz oder Geländer) wurde bei der Hochrechnung nicht erhoben, weshalb hier 2 % bis 8 % der LZK fehlen.
- Innentüren und -fenster wurden bedingt durch die vereinfachte Flächenermittlung nicht erhoben (KG 340); diese haben bei der genauen Projektberechnung einen Anteil von 1,5 bis 5,0 % am Gesamtergebnis der KG 300.
- Die Flächenermittlung für die Hochrechnung ist stark vereinfacht und es werden beispielsweise Fensterlaibungen übermessen. Somit ist die Massenbilanz bei der Hochrechnung niedriger als bei der Ermittlung.
- Die Herstellungskosten für die gleiche Kostengruppe können je nach Bauteilaufbau stark schwanken – z.B. Außenwände bei Projekt C, vgl. Abbildung 6-25. Wählt man hier „günstige Aufbauten“ oder verhalten sich die Flächenverteilungen später in der Ausführung anders (vgl. Projekt A), ergeben sich hier größere Abweichungen.
- Die Reinigungskosten schwanken je nach Oberflächenmaterial stark. Hier ist eine Abschätzung ohne die Kenntnis über die konkrete Ausführung schwierig. Bei der Hochrechnung werden zudem nicht alle im Projekt vorkommenden Fußbodenmaterialien abgebildet, sondern nur die der Regelaufbauten mit den größten Flächenanteilen.

- Analog zu den Reinigungskosten sind die Kosten für den Austausch und Ersatz ebenfalls stark von den eingesetzten Materialien abhängig und können größeren Schwankungen unterworfen sein.
- Die Kosten für die Inspektion und Wartung (B2) sowie für regelmäßige Instandsetzungen (B3) werden nach BNB-Vorgabe in Abhängigkeit der Herstellungskosten berechnet. Demnach bedingen bei dieser Bilanzierung geringere Herstellungskosten theoretisch geringere Folgekosten und somit Gesamtkosten.

Rechtlich festgeschriebene Toleranzgrenzen zwischen Kostenschätzung und -berechnung gibt es nicht, es existieren lediglich Literaturangaben oder diverse Rechtsprechungen, wonach Abweichungen von 25 bis 40 % gängig sind. (MEK, 2012; BauNetz Media, o.J.; Struck, o.J.). Die hier vorliegenden Abweichungen liegen demnach, bis auf die Abweichung in der KG 340, im Toleranzbereich für Kostenschätzungen in frühen Planungsphasen. Die Methode wird somit für die Verwendung in der Variantenstudie des Fallbeispiels (vgl. Kapitel 7.3.2) als verwendungsfähig angesehen.

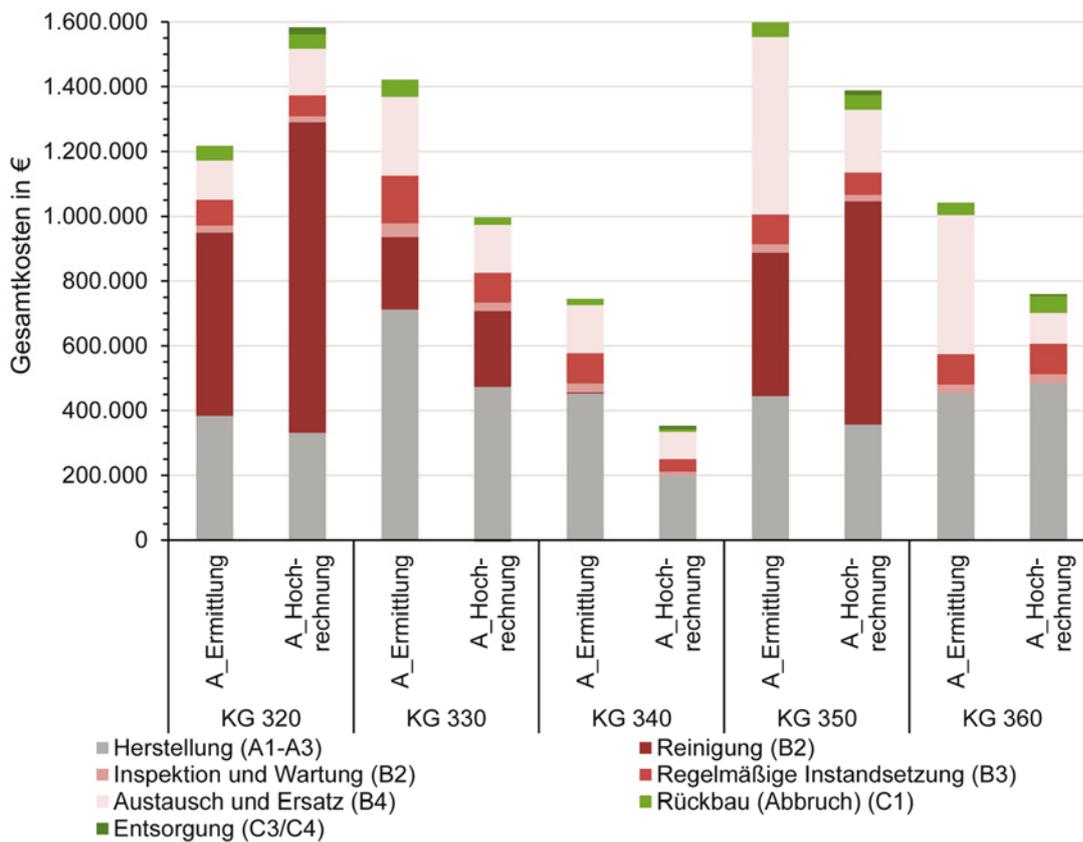


Abbildung 7-7: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung der LZK, Projekt A (eigene Darstellung)

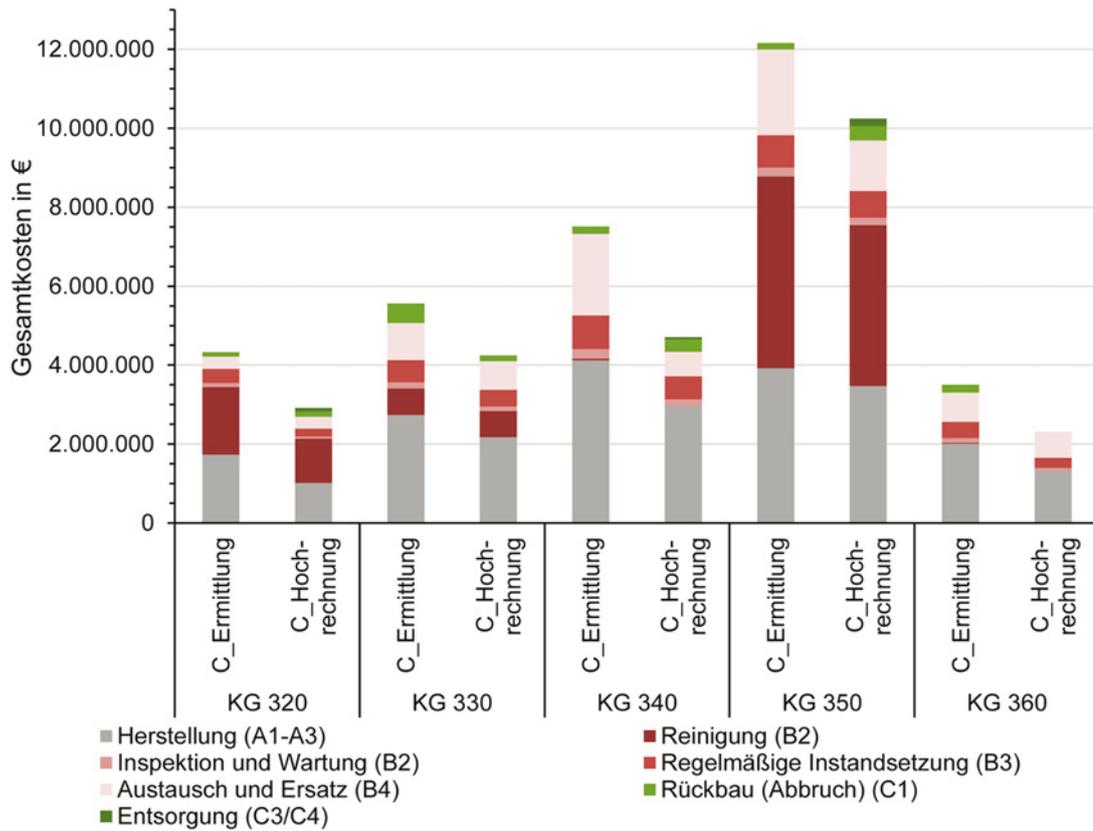


Abbildung 7-8: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung der LZK, Projekt C (eigene Darstellung)

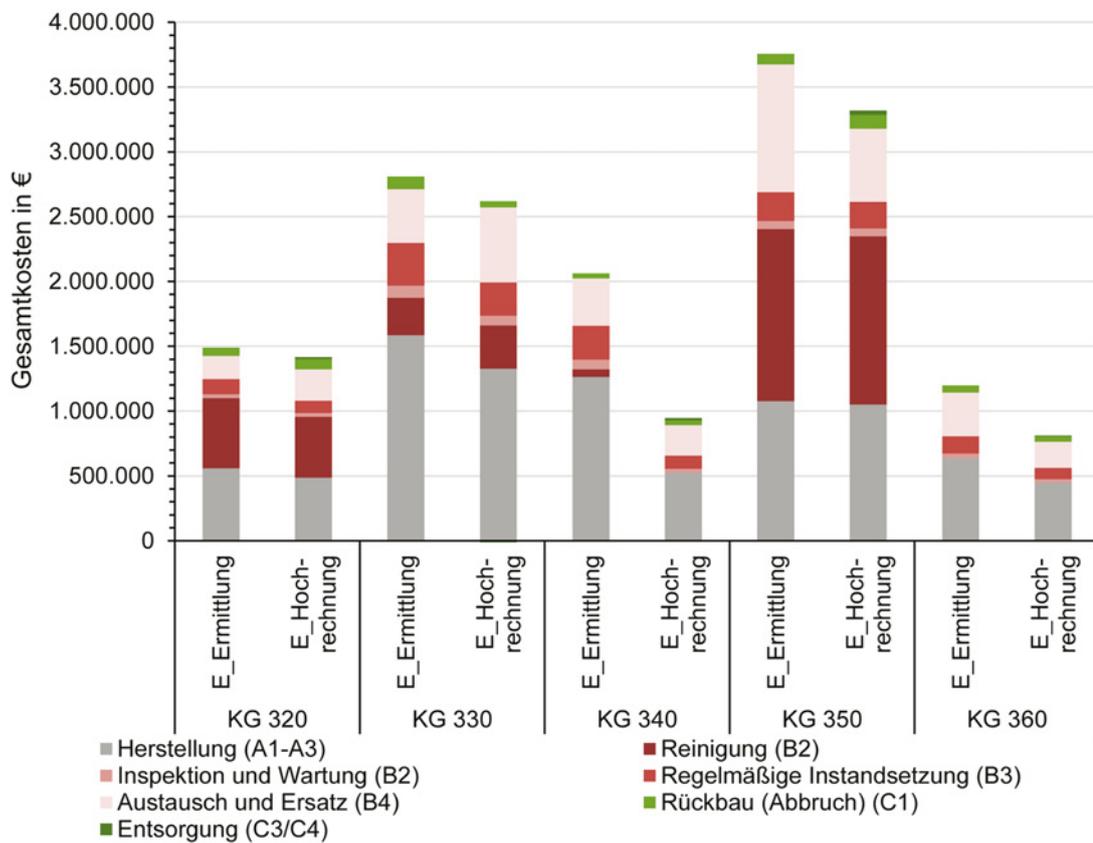


Abbildung 7-9: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung der LZK, Projekt E (eigene Darstellung)

## 7.3 Fallbeispiel Projekt X

Um die in den vorangegangenen Kapiteln erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse zu überprüfen und in den laufenden Planungsprozess eines Gebäudes einzubringen, wird ein Gebäude ausgewählt, dessen Leistungsphasen 1 bis 3 während des vorliegenden Forschungsprojektes stattfinden. Im Folgenden wird das Gebäude als Projekt X bezeichnet.

### 7.3.1 Projektbeschreibung

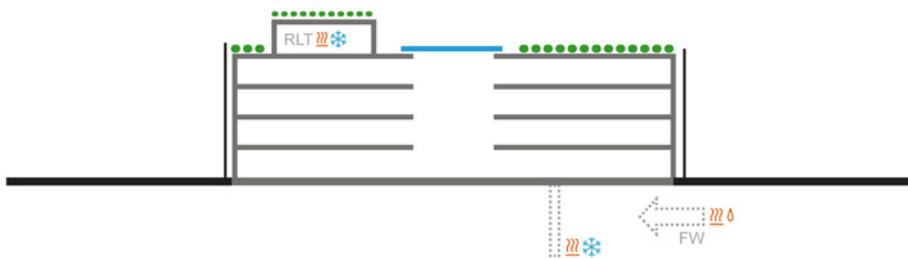


Abbildung 7-10: Gebäudeschema Projekt X (eigene Darstellung)

Projekt X ist ein viergeschossiges Bürogebäude mit einer NGF von 6.500 m<sup>2</sup> und einer kleinen Technikzentrale auf dem Dach. Das Gebäude ist Teil eines Ensembles aus Bürogebäude, Testcenter und Logistikhalle. Es soll in Stahlbetonskelettbauweise mit einem größtmöglichen Holzanteil erstellt werden. Neben den Büroräumen befinden sich im Gebäude eine Mitarbeiterkantine sowie Schulungs- und Besprechungsräume. Eine Besonderheit des Gebäudes ist ein zentrales Atrium mit Glasdach sowie ein offener Lichthof.

Das Gebäude soll im Erdgeschoss eine Stahlbetonaußenwand und in den oberen Geschossen eine nichttragende Holzrahmenbauwand erhalten. Die opaken Bereiche sind mineralisch gedämmt und mit hinterlüfteten Metallpaneelen verkleidet.

Die Heizenergieversorgung erfolgt über einen Fernwärmeanschluss aus erneuerbaren Energien mit einem sehr guten Primärenergiefaktor (0,23) und eine Geothermie-Anlage für die Gebäudekühlung. Das Gebäude verfügt außerdem über eine Lüftungsanlage mit Heiz- und Kühlfunktion.

### 7.3.2 Variantenstudie Baukonstruktion

Mit einer Differenzbetrachtung der Baukonstruktion wird untersucht, in welchem Umfang eine ökologische Verbesserung (hier: hinsichtl. des GWP) durch einen alternativen Katalog von Regelaufbauten erzielt werden kann. Ergänzend dazu wird untersucht, wie sich die Ausführung der ökologischen Variante gegenüber der konventionellen auf die Lebenszykluskosten auswirkt. In der Planungspraxis wird dieses Ausmaß der Verbesserung nicht immer vollständig auszuschöpfen sein, da diese vereinfachende Betrachtung wechselseitige Abhängigkeiten und individuelle Gegebenheiten wie z.B. spezifische Anforderungen des Nutzers oder technische und rechtliche

Rahmenbedingungen nicht vollumfänglich berücksichtigen kann. Sie dient hier lediglich der näherungsweise Ermittlung des Potentials einer Verbesserung.

Eine Planungsvariante „X\_conv“ mit vergleichsweise konventionellen und überwiegend mineralischen Aufbauten, wie sie in den untersuchten Beispielprojekten vorkommen, wird einer Variante „X\_eco“ mit Regelaufbauten gegenübergestellt, die eine hinsichtlich des GWP verbesserte Variante darstellt.

Tabelle 7-3 gibt eine Übersicht der wesentlichen Anpassungen der Differenzbetrachtung. Eine detaillierte Übersicht der Bauteilaufbauten findet sich im Anhang A3 – Bauteilaufbauten Projekt X. Die Regelaufbauten für die Variante „X\_eco“ werden dabei nicht im Sinne einer dynamischen Optimierung zum Maximum der möglichen GWP-Einsparung geführt, sondern entsprechen einer im Büro- und Verwaltungsbau zeitgemäßen Konstruktionsalternative: Sie bilden eine Holz-Beton-Verbundbauweise ab, mit einem Tragwerk aus Stahlbetonstützen und Verbunddecken. Die wesentlichen Anforderungen aus Brandschutz und Statik finden sich in den Bauteilen wieder, müssten jedoch selbstverständlich in den weiteren Planungsphasen detailliert werden.

Wo immer es als vertretbar erachtet wird, wird auf Bekleidungen innen (Vorsatzschalen, abgehängte Decken) verzichtet. Der Hohlboden hingegen wird beibehalten, um eine vom Nutzer gewünschte flexible Installationsführung sicherzustellen.

Die Optimierung erfolgt unter dem Fokus der Treibhausgaseinsparung. Es werden Baustoffe ausgewählt, deren lebenszyklusbasiertes Treibhauspotential möglichst gering liegt. Soweit sie schon bekannt sind, werden konstruktive und rechtliche Projektanforderungen berücksichtigt.

Tabelle 7-3: Wesentliche Änderungen der Regelaufbauten (eigene Darstellung)

Kostengruppe		Regelaufbau „X_conv“	Regelaufbau „X_eco“
<b>KG 320</b>	KG 325	Bodenbelag Steinzeugfliesen Trittschalldämmung EPS	Bodenbelag Stabparkett Trittschalldämmung Mineralfaser sowie Schüttung
	KG 326	Perimeterdämmung XPS	Perimeterdämmung Schaumglas
<b>KG 330</b>	KG 331, KG 332	StB-Wände	StB-Wände (EG) Holzständerwände (OG)
	KG 332	Dämmung Mineralwolle	Dämmung Steinwolle (Brandsch.)
	KG 334	Fassaden-/ Fensterprofile Aluminium	Fassaden-/ Fensterprofile Holz mit Deckschale aus Aluminium
	KG 335	Unterkonstruktion der Fassade in Metall	Unterkonstruktion der Fassade in Holz
	KG 336	Vorsatzschale mit Alu-UK	Vorsatzschale mit Holz-UK (EG) Direktbeplankungen (OG)
<b>KG 340</b>	KG 342	Leichtbau mit Alu-UK	Leichtbau mit Holz-UK
	KG 341 KG 343	StB-Innenwände und -Stützen	StB-Innenwände und -Stützen
<b>KG 350</b>	KG 351	StB-Decken	StB-Decke (ü. EG) Verbunddecken (ü. OG)
	KG 352	Bodenbelag Teppich	Bodenbelag Parkett
	KG 353	GK-Abhangdecken	Gipsputz (unter StB-Decke) Direkt-Beplankung (unter Verbunddecken)
<b>KG 360</b>	KG 361	StB-Decke	Verbunddecke
	KG 363	Dämmung EPS Kiesdach	Dämmung Mineralwolle Gründach
	KG 364	GK-Abhangdecke	Direkt-Beplankung (unter Verbunddecken)

### 7.3.2.1 LCA

Die Differenzbetrachtung der beiden Planungsvarianten nach Kostengruppen (vgl. Abbildung 7-11, Tabelle 7-4) lässt folgende Potentiale erkennen:

- Ein großer Effekt ist erzielbar bei den **KG 330 und 350**, den Außenwänden und den Decken. Insbesondere bei **KG 350** zeigt sich im gegebenen Projekt das größte relative und auch absolute Einsparpotential, zum einen weil die Decken mit hoher Flächenquantität auftreten, zum anderen, weil der Regelaufbau des Bauteils durch eine andere Materialwahl eine deutliche Verbesserung seines Treibhauspotentials zulässt.
- Die **KG 340** (Innenwände) hat zwar vergleichbar hohe Flächenanteile inne, jedoch ist hier das erzielbare Maß der Verbesserung geringer, da der Regelaufbau von bspw. Leichtbauwänden nur in geringem Umfang konstruktive Alternativen zulässt. In der Variante „X\_eco“ erhalten die Leichtbau-Innenwände eine Unterkonstruktion aus Holz anstelle Stahlblechprofilen. Die tragenden Wände und Stützen in StB werden hingegen beibehalten. Wenn die bestimmenden Planungsparameter es zulassen, könnten hier mit einer tragenden Holzkonstruktion bessere GWP-Werte erzielt werden.
- „Sowieso“- Umweltwirkungen bestehen bei der **KG 320**: Es gibt nur wenige gleichwertige Alternativen zur Stahlbeton-Bodenplatte; auch die Anforderungen an die Abdichtung lassen nur wenig Varianz zu. Jedoch konnte eine Verbesserung von 20,5 % allein durch das Dämmmaterial Glasschaum anstelle von XPS erzielt werden.

Der Vergleich anhand der funktionalen Kategorien (vgl. Abbildung 7-12, Seite 118) zeigt:

- Optimierungen sind v.a. im **Tragwerk** möglich: Hier kann insgesamt eine Verbesserung von 14,5 % erzielt werden, in den Phasen A1-A3 gar um 64,2 %.
- Die **Fassade** bildet über alle Kategorien hinweg einen vergleichsweise geringen Anteil, bietet jedoch hohe Einsparpotentiale um insgesamt 9,4 %, in den Phasen A1-A3 um 61,6 %.
- Die größte quantitative und relative Einsparung zeigt sich in der Kategorie **Innenausbau** in Höhe von 43,6 %. Hier macht sich besonders die Auswahl von Bodenbelägen mit geringem GWP in der Herstellung und niedrigen Austauschzyklen bemerkbar, vgl. KG 320 und 350. Auch der Verzicht auf Verkleidungen wie Vorsatzschalen und Abhangdecken schlägt sich auf die Reduktion des Treibhauspotentials nieder. Wo diese erforderlich sind, wirkt die Wahl von Holz- anstelle Metall-Unterkonstruktionen senkend auf die GWP-Bilanz.
- Die **Dämmung und Abdichtung von Dach und Fundament** ist im Gesamtbild ein eher untergeordneter Posten, jedoch mit hohen Einsparpotentialen. In der Herstellung zeigt sich hier eine Erhöhung durch die Wahl einer Mineralfaser-Dachdämmung, die jedoch auf den gesamten Lebenszyklus wiederum günstiger ist. Dieser bilanzielle Vorteil ergibt sich jedoch primär dadurch, dass im eLCA-Tool für verschiedene Dämmmaterialien verschiedene Lebensdauern hinterlegt sind. Die Nutzungsdauern der Dämmstoffe sind hier materialbezogen angepasst, wohingegen nach BNB nicht zwischen den Dauerhaftigkeiten verschiedener Dämmmaterialien unterschieden wird (BMUB, 2017). Materialbezogene Nutzungsdauern haben aber einen signifikanten Einfluss auf den Lebenszyklus, so dass empfohlen wird, diese differenziert zu betrachten.

- Bei den **Fenstern** werden Holzprofile anstelle Aluminiumprofile angesetzt. Jedoch werden Aluminium-Deckschalen beibehalten, aus Gründen des geringen Instandhaltungsaufwands und des vom Nutzer gewünschten optischen Erscheinungsbildes.

In der Gesamtsumme findet eine deutliche Reduzierung und auch eine Verschiebung statt: Der Holzanteil verringert die Wirkungen in der Herstellungsphase, zieht jedoch höhere Umweltwirkungen in der Phase C3/C4 nach sich. Da erst in der Phase D Holz die Gutschriften erhält, die sich aus der Verbrennung in Phase C3 ergeben, so dass sich der Vorteil des nachwachsenden Rohstoffes Holz gegenüber mineralischen und fossilen Baustoffen in Form eines negativen GWP abbildet, wird die Phase D zusätzlich dargestellt (Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12).

Bei der „konventionellen“ Materialwahl sind also die Phasen A1-A3 im Vordergrund, bei „X\_eco“ verschiebt sich der Anteil der Umweltwirkungen von den Herstellungsphasen in die Entsorgungsphase (C3/C4). Gerade bei den Bauteilen der Kostengruppen mit den größten Flächenanteilen bietet eine Optimierung des Regelaufbaus einen wirksamen Ansatzpunkt, da sie am meisten zur Gesamtbilanz beitragen. Das insgesamt erzielte Maß der Verbesserung beläuft sich auf 22 % (Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Prozentuale Reduktionspotentiale des GWP je Kostengruppe (eigene Darstellung)

Kostengruppe	Prozentuale Gegenüberstellung		Reduktion	
	Projekt X „conv“	Projekt X „eco“	prozentual	in [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> ]
KG 320	100 %	78,6 %	-21,4 %	-0,27
KG 330	100 %	85,0 %	-15,0 %	-0,41
KG 340	100 %	96,7 %	-3,3 %	-0,03
KG 350	100 %	64,2 %	-35,8 %	-1,07
KG 360	100 %	79,7 %	-20,1 %	-0,21
<b>Gesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>78 %</b>	<b>-22 %</b>	<b>-2,00</b>

Tabelle 7-5: Reduktionspotentiale des GWP je funktionale Kategorie (eigene Darstellung)

Fkt. Kategorie	Prozentuale Gegenüberstellung		Reduktion	
	Projekt X „conv“	Projekt X „eco“	prozentual	in [kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> ]
Tragwerk	100 %	85,5 %	-14,5 %	-0,51
Fassade mit Dä./Abd.	100 %	90,6 %	-9,4 %	-0,06
Innenbau	100 %	56,4 %	-43,6 %	-1,03
Dä/ Abd. Dach/Fund.	100 %	64,1 %	-35,9 %	-0,29
Fenster/ Türen	100 %	93,8 %	-6,2 %	-0,11
<b>Gesamt</b>	<b>100 %</b>	<b>78 %</b>	<b>-22 %</b>	<b>-2,00</b>

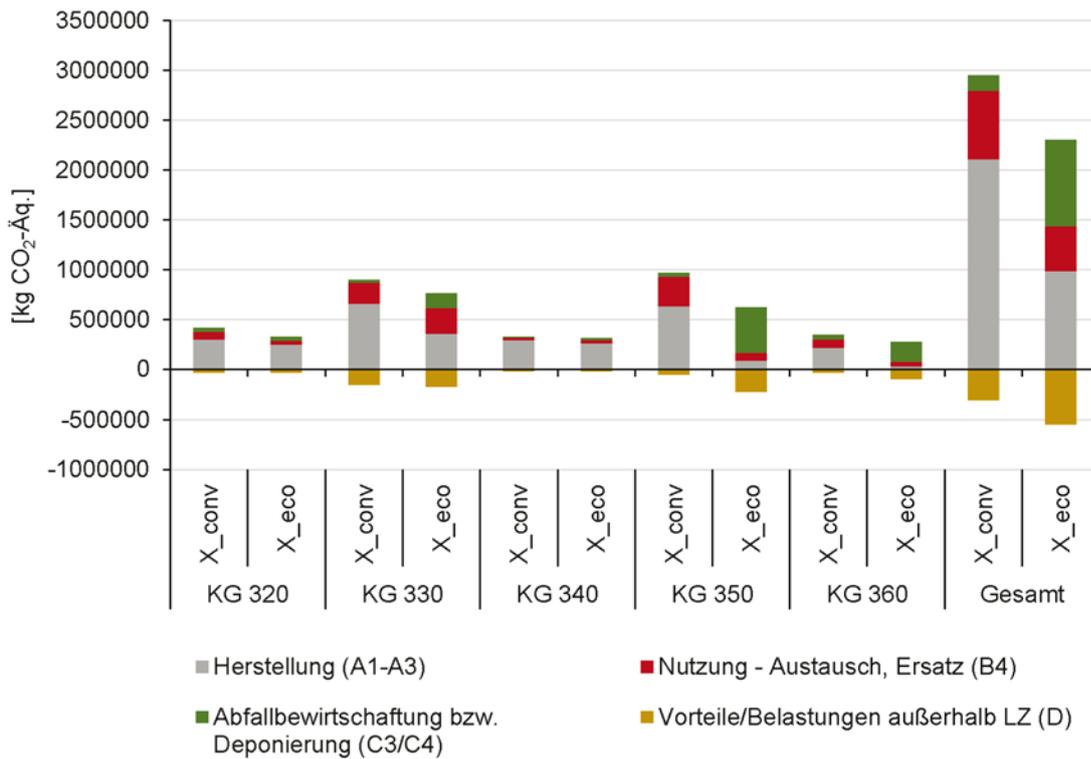


Abbildung 7-11: Projekt X, Vergleich der LCA-Hochrechnung nach Gesamtbilanz und Kostengruppen (eigene Darstellung)

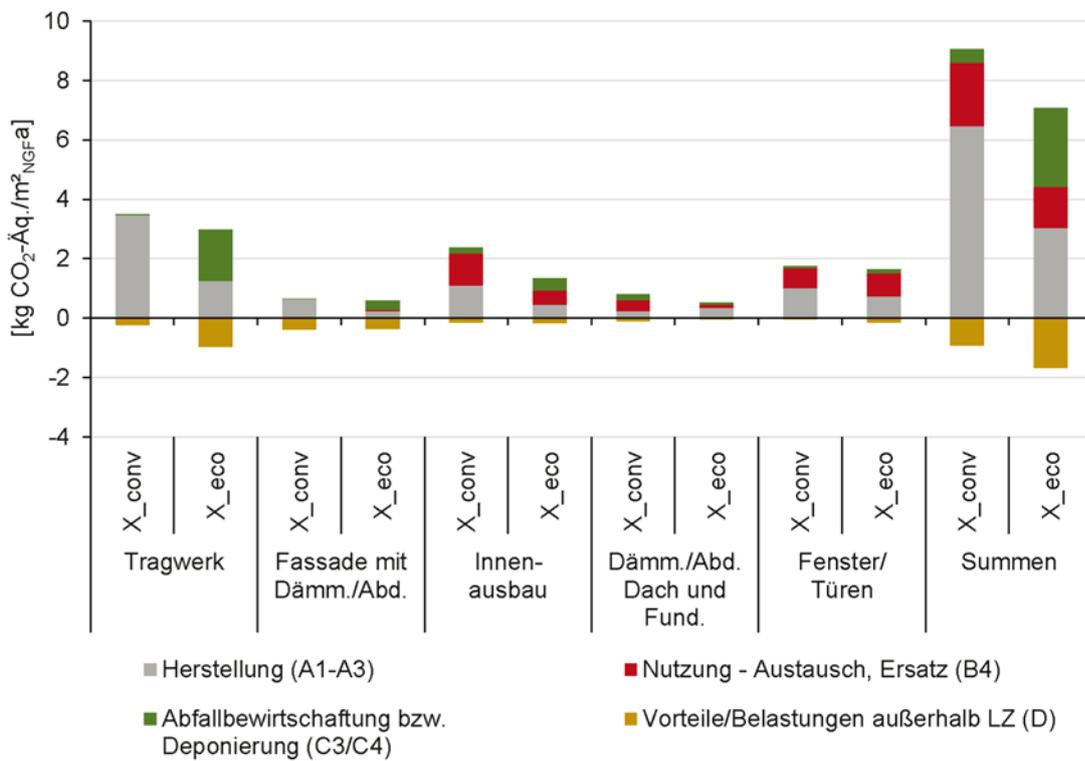


Abbildung 7-12: Projekt X, Vergleich der LCA-Hochrechnung nach funktionalen Kategorien je m<sup>2</sup><sub>NGF</sub> und Jahr (eigene Darstellung)

## 7.3.2.2 LCC

Die Differenzbetrachtung der konventionellen und ökologischen LCC-Hochrechnung weist leichte Unterschiede in der Verteilung der LZK auf. Wohingegen die ökologische Variante in der Herstellung 11,2 % teurer ist, gleichen sich diese Kosten über die LZPH hinweg wieder an. Der Unterschied bei den Gesamtkosten liegt bei 0,8 % (siehe Abbildung 7-13). Der Anteil der KG 350 an den Gesamtkosten ist in beiden Fällen am höchsten. Es folgen die Kosten der KG 330, die bei der ökologischen Variante ebenso viel Einfluss wie die der KG 350 nehmen. Die Kosten für die Dachdecke (KG 360) unterscheiden sich nur wenig. Die Bauteilaufbauten der Innenwände sind nahezu identisch. Hier wurden in der ökologischen Variante lediglich die Blechprofile der nichttragenden Innenwände gegen Holzständer ausgewechselt.

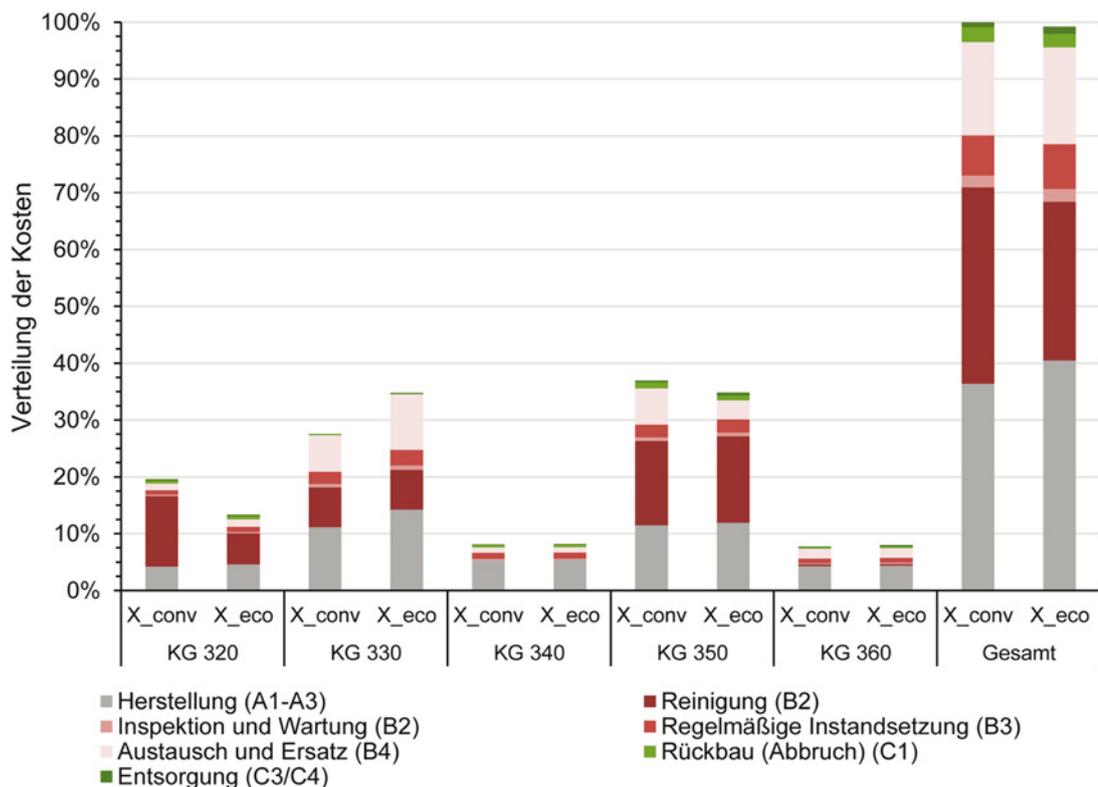


Abbildung 7-13: Projekt X, Vergleich der LCC-Hochrechnung nach prozentualer Verteilung der Kosten je Kostengruppen (eigene Darstellung)

Bei der Differenzbetrachtung der Bodenplatte (KG 320) zeigt sich erneut, dass die Reinigungskosten die LZK dominieren (Anteil von 41 % und 64 %). Die 10 % teurere Herstellung der ökologischen Variante relativiert sich über die Reinigungskosten, welche nur 44 % der Reinigungskosten der konventionellen Variante ausmachen. Diese Einsparung gleicht die geringen Mehrkosten in den restlichen LZPH aus. Insgesamt können so die LZK um 32 % verringert werden.

Zusammenfassend punkten bei der ökologischen Ausführung die geringeren Reinigungskosten, allerdings bedingt sie höhere Kosten für die Herstellung, die regelmäßige Instandsetzung und Wartung sowie den Austausch und Ersatz der Materialien.

Gegliedert nach den funktionalen Kategorien (Abbildung 7-14) erkennt man, dass insbesondere die Nutzungskosten des Innenausbaus steuerbar sind. Auch die LZK für Fenster und Türen können durch die Wahl langlebiger und pflegeleichter Materialien reduziert werden.

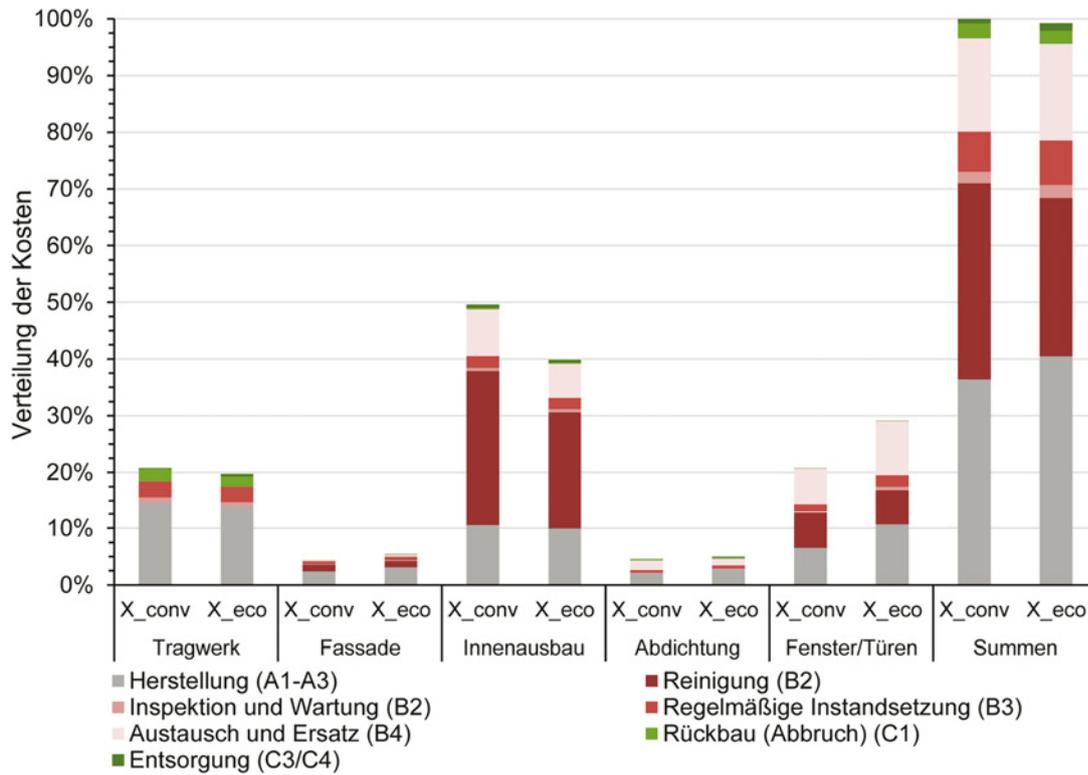


Abbildung 7-14: Projekt X, Vergleich der LCC-Hochrechnung nach prozentualer Verteilung der Kosten je funktionaler Kategorie (eigene Darstellung)

### 7.3.2.3 Zusammenfassung

Insgesamt zeigt die Hochrechnung der Varianten für Projekt X (Abbildung 7-15), dass sich durch die ökologische Variante eine Reduktion der Umweltwirkungen zu jedem Zeitpunkt des Lebenszyklus realisieren lässt. Hinsichtlich der Lebenszykluskosten findet eine Verschiebung statt. Während die Herstellungskosten der ökologischeren Variante 11,2% höher liegen als die der konventionellen Variante, relativiert sich dieser Unterschied in der Nutzungsphase, so dass die ökologischeren Variante vor und nach der Entsorgungsphase gleich hohe Kosten aufweist wie die konventionelle Variante.

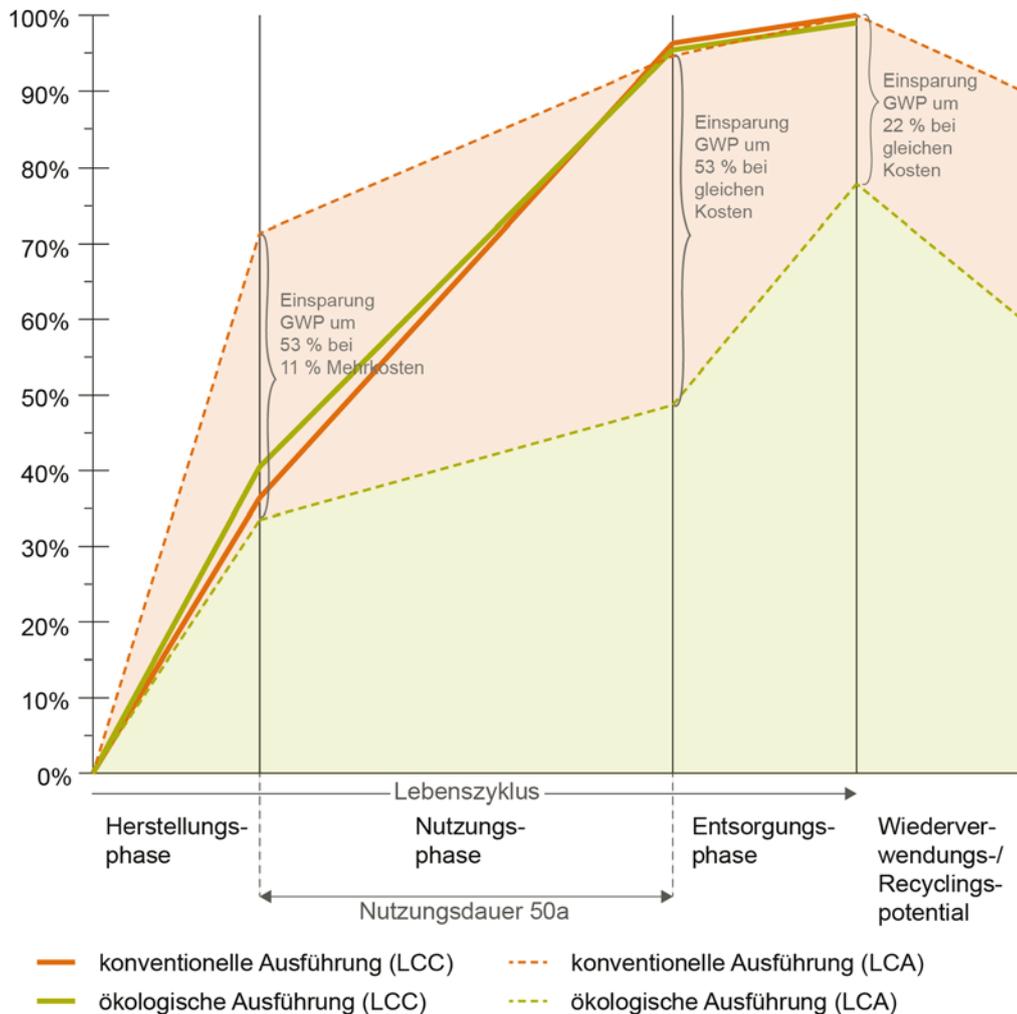


Abbildung 7-15: Projekt X, Differenzbetrachtung von GWP und LZK über den Lebenszyklus (eigene Darstellung)

### 7.3.3 Variantenstudie Betrieb

In Anlehnung an Kapitel 6.4.3 wird auch für Projekt X eine LCA-Variantenstudie auf der Basis der Erzeugernutzenergiebedarfe durchgeführt. Da sich das Projekt im Planungsprozess befindet, wird zudem eine alternative Betriebsenergieberechnung durchgeführt.

Das Projekt weist in beiden Varianten einen sehr niedrigen Heizenergiebedarf aufgrund eines sehr guten A/V Verhältnisses und eines sehr guten U-Wertes der opaken Außenbauteile auf. Allerdings ist der Kühlbedarf in Variante 1 höher als der Bedarf der Beispielprojekte. Dies ist auf den hohen Verglasungsanteil der Wände und besonders des Daches zurückzuführen.

Daher wird in Variante 2 eine Sonnenschutzverglasung, außenliegender Sonnenschutz und Grundwasserkühlung einberechnet. Eigenverschattung und Verschattung durch umliegende Gebäude können nur in einer Simulation berücksichtigt werden, die in einer frühen Planungsphase üblicherweise nicht durchgeführt wird.

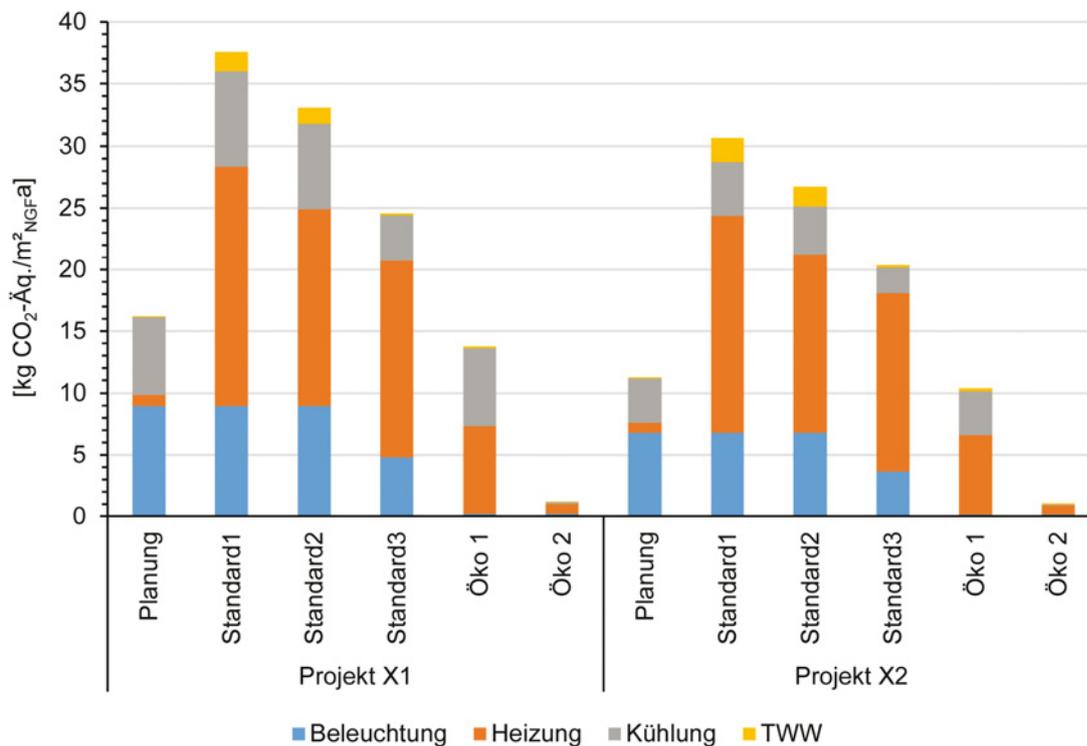
Zudem wird die Beleuchtung detailliert eingegeben. Das Gebäude wird durch regenerativ erzeugte Fernwärme versorgt.

Tabelle 7-6: Ergebnisse der EnEV-Berechnungen Projekt X Variante 1 und 2

Art des Energiebedarfs		Projekt X Variante 1	Projekt X Variante 2
Nutzenergiebedarf nach EnEV (kWh/m <sup>2</sup> a)	Heizung	52,49	46,83
	Lüftung	0	0
	Warmwasser	0,04	9,8
	Kühlen	47,88	33,69
	Beleuchtung	3,1	4,46
Endenergiebedarf nach EnEV (kWh/m <sup>2</sup> a)	Heizung	67,93	62,68
	Lüftung	18,94	18,53
	Warmwasser	5,55	6,83
	Kühlen	27,34	8,23
	Beleuchtung	15,53	11,79
Erzeugernutzenergiebedarf laut Nachweis EEWärmeG (kWh/m <sup>2</sup> a)	gesamt	133	132

Tabelle 7-7: Bauliche Eingabegrößen Projekt X

		Projekt X Variante 1	Projekt X Variante 2
Mittlere U-Werte (W/m <sup>2</sup> K)	opake Außenbauteile	0,19	0,20
	transparente Abt.	0,9	0,87
	Vorhangfassade	-	1,0
	Glasdächer, Lichtbänder,...	1,8	1,8
	HT'	0,454	0,468
A/V Verhältnis (1/m)		0,21	0,22
Fensterflächenanteil (%)		37	38,5


 Abbildung 7-16: Projekt X, Vergleich der Szenarien Gebäudebetrieb (Szenarien s. Kapitel 6.4.3): Treibhauspotential je m<sup>2</sup>NGFA und Jahr (eigene Darstellung)

Die Variantenstudie (Abbildung 7-16) zeigt, dass die geplante Versorgung mit regenerativer Fernwärme („Planung“) schon sehr gute Werte bezüglich GWP aufweist. Auffällig ist die Bedeutung von Beleuchtung und Kühlung, da hier der deutsche Strommix verwendet wird. Es ist abzulesen, dass sich durch die Optimierung des Sonnenschutzes und die detaillierte Berechnung der Beleuchtung der Strombedarf sichtbar senken lässt, so dass das GWP der Projektvariante X2 nahe am GWP des Szenarios „Öko1“ liegt. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit bestünde in der Verwendung erneuerbarer Stromquellen (Szenario „Öko2“).

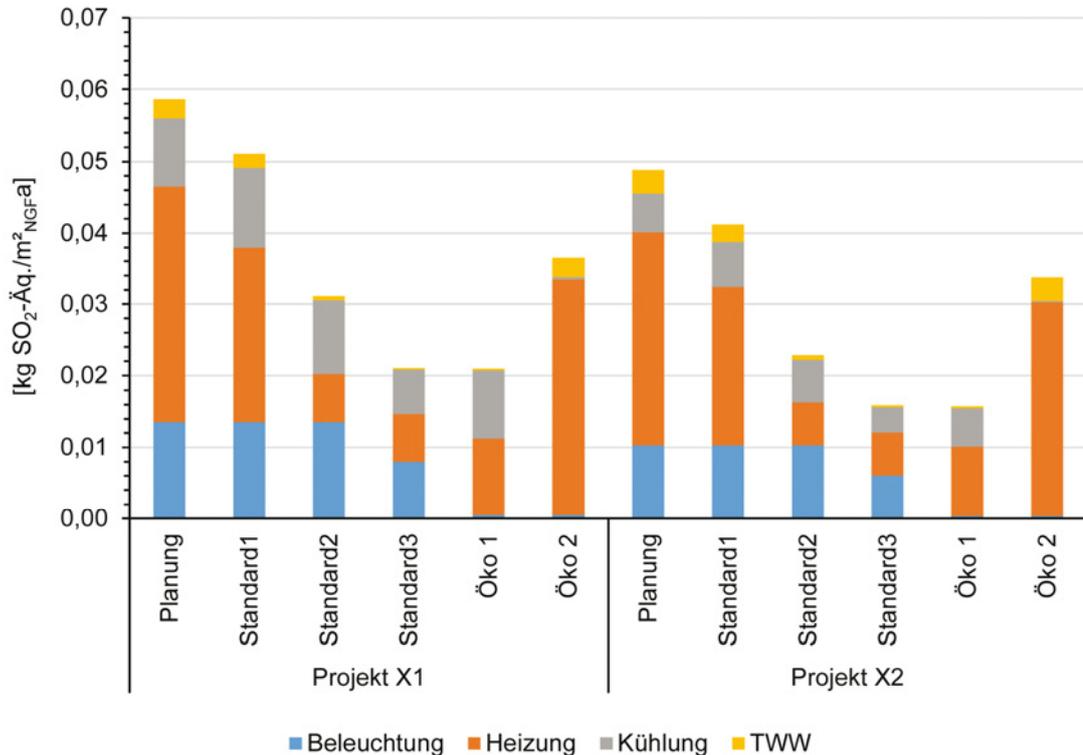


Abbildung 7-17: Projekt X, Vergleich der Szenarien Gebäudebetrieb (Szenarien s. Kapitel 6.4.3): Versauerungspotential je  $m^2_{NGF}$  und Jahr (eigene Darstellung)

Hinsichtlich Versauerungspotential ist die Tendenz der Variantenstudie aus Kapitel 6.4.3 wiederzufinden: Das AP der Versorgung mit Biomasse ist signifikant höher als das der Versorgung mit fossilen Brennstoffen. Dadurch ergibt sich ein gegenteiliges Bild der Treiber, da der Heizenergiebedarf für das AP zur ausschlaggebenden Größe wird.

Um alle Umweltwirkungen mit einzubeziehen, werden ebenfalls die Eco-Costs berechnet. Die Ergebnisse können Abbildung 7-18 entnommen werden. Diese Berechnung ergibt ein ähnliches Bild zur GWP-Berechnung. Das größte Optimierungspotential auf der Versorgungsseite liegt in der Verwendung erneuerbarer Stromquellen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Optimierung der Versorgung (Projektvarianten X1, X2) zwar zu einer Senkung der Umweltwirkungen führt, ein noch größeres Optimierungspotential aber zeigt die Stromversorgung.

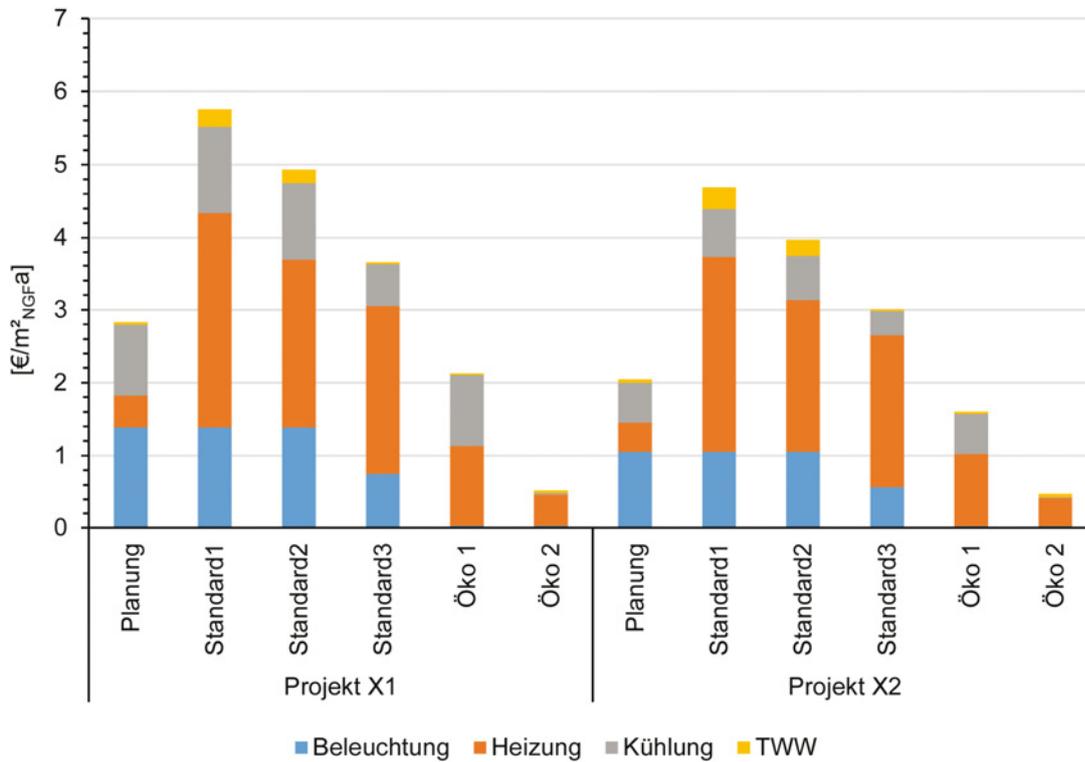


Abbildung 7-18: Projekt X, Vergleich der Szenarien Gebäudebetrieb (Szenarien s. Kapitel 6.4.3): Eco-Costs je  $m^2_{NGF}$  und Jahr (eigene Darstellung)

## 7.4 Strategische Parameter

In den nachfolgenden Tabellen werden die Eigenschaften der funktionalen Kategorien und die einflussnehmenden Parameter für LCA und LCC jeweils zusammenfassend beschrieben. Relevante Stellschrauben sind dabei der Energiestandard, die Art der Energieversorgung, die Materialwahl, die Wahl der Austauschzyklen sowie der Reinigungsaufwand für Oberflächenmaterialien der Fassade und des Innenausbau. Je nach funktionaler Kategorie müssen diese Stellschrauben in frühen Planungsphasen untersucht werden oder können erst im weiteren Planungsverlauf finalisiert werden.

Tabelle 7-8: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Tragwerk und Fassade (eigene Darstellung)

Bauwerk- oder TGA-Komponenten	Einflussparameter	
	LCA	LCC
<p><b>Tragwerk</b> (Stb.-Skelett- bzw. Stb.-Schottenbauweise; z.T. Innenwände aus Mauerwerk)</p> <p>(Flachgründungen, Bodenplatte, tragende Außen- und Innenwände, Außen- und Innenstützen, Decken- und Dachkonstruktionen)</p>	<p>Das Tragwerk ist der <b>wesentliche Treiber der KG 300</b>, der in frühen Planungsphasen durch Materialwahl und Wahl des Tragsystems gesteuert werden kann.</p> <p>Der Einfluss bedingt sich bereits durch den hohen Masseanteil:</p> <p>Anteil des Tragwerks in der KG 300: GWP &gt; 37 % PENRT &gt; 24 % AP &gt; 22 %</p> <p style="text-align: center;"><b>Einfluss einzelner Parameter</b></p> <p>Geschossdecken sind immer relevant; je mehr Geschosse, umso mehr Einfluss.</p> <p>Bei geringer Geschosshöhe (&lt;3) sollte man auch das Optimierungspotential der Dachdecke und der Bodenplatte untersuchen.</p> <p>Der Einfluss der Außenwand kann durch Stahlbetonskelettbauweise verringert werden.</p>	<p>Anteil des Tragwerks an den gesamten LZK &gt; 18 % Davon mehr als 70% für die Erstellung, ca. 20% Nutzungskosten und 3%-11% Rückbaukosten</p> <p>Mit steigender Geschosshöhe (&gt;2) sinkt die Relevanz von Dachdecke und Bodenplatte</p>
<p><b>Fassade mit Außendämmung/ Abdichtung</b> (Vorhangfassaden inkl. Dämmschichten, opake Bereiche von Pfosten-Riegel-Fassaden, WDVS)</p> <p>(Nichttragende Außenwände, Brüstungen, Ausfachungen und äußere Außenwandbekleidungen)</p>	<p>Der Einfluss der Fassade auf den Lebenszyklus eines Gebäudes ist relativ gering. Durch die Materialwahl kann der Einfluss gesteuert werden.</p> <p>Max. 23 % der Umweltwirkungen (AP) der KG 300 werden von der Fassade beeinflusst. Wesentlicher Treiber ist das Material (hier: Aluminium)</p> <p>Es bestehen große Unterschiede unter den Fassadenmaterialien bezogen auf die Nutzungskosten (Reinigung vs. Instandsetzung) und Umweltwirkungen.</p> <p style="text-align: center;"><b>Einfluss einzelner Parameter</b></p> <p>Die Fassade besitzt einen Anteil von &gt; 13 % am AP, wenn die Geschosshöhe &gt; 5 ist.</p> <p>Maßgebend ist die Fassadenverkleidung, insbesondere, wenn sie aus Metall ist.</p>	<p>Bei den Lebenszykluskosten hat die Fassade einen Kostenanteil von max. 10 %.</p> <p>Die opake Fassade besitzt einen geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten, da beispielsweise größere Reinigungskosten entfallen</p>

Tabelle 7-9: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Innenausbau, Dämmung (eigene Darstellung)

Bauwerk- oder TGA-Komponenten	Einflussparameter	
	LCA	LCC
<p><b>Innenausbau</b> (leichte Trennwände aus GK-Wandbauplatten oder Mauerwerk, GK-Abhangdecken, Putze und Anstriche, Hohlraumböden, Standardbeläge inkl. Teppichen, Fliesen, Parkett oder Naturstein)</p> <p>(Boden- und Deckenbeläge, Decken-, Dach-, Wand- und Stützenbekleidungen, nichttragende und elementierte Innenwände)</p>	<p>Der Innenausbau ist zweitgrößter Treiber der Umweltwirkungen im Lebenszyklus.</p> <p>Insbesondere dafür verantwortlich sind die Austauschzyklen, die durch die Materialwahl optimiert werden können. Die Materialwahl für Bodenbeläge oder Wandverkleidungen kann noch in späteren Planungsphasen erfolgen, sollte aber konzeptuell in frühen Planungsphasen definiert werden.</p>	<p>Bei der LCC nimmt der Innenausbau sogar mehr Einfluss als das Tragwerk. (29 % bis 41 % an den LZK).</p>
	<b>Einfluss einzelner Parameter</b>	
	<p>Fußbodenaufbauten sind immer maßgebend.</p> <p>Bauteile und Bauteilschichten sollten eine möglichst lange Lebensdauer aufweisen, um Austauschzyklen gering zu halten.</p> <p>Der Innenausbau nimmt unabhängig von der Gebäudelebensdauer hohen Einfluss.</p>	<p>Auf Bauteile mit langen Lebensdauern ist zu achten, um die Kosten für die Instandsetzung so gering wie möglich zu halten.</p> <p>Die Lebenszykluskosten des Innenausbaus sinken bzw. steigen proportional entsprechend dem Betrachtungszeitraum.</p>
<p><b>Dämmung/ Abdichtung Dach und Fundament</b> (Perimeter- und Dachdämmung, Sauberkeitsschichten, Abdichtungsmaterialien, Dachbegrünung, -bekiesung)</p> <p>(Bauwerksabdichtungen inkl. Dämmschichten unterhalb der Bodenplatte, Dachbeläge)</p>	<p>Nach dem Tragwerk und Innenausbau ist die Kategorie Dämmung/ Abdichtung Dach und Fundament der drittgrößte Treiber der KG 300, dessen Einfluss im Wesentlichen über die Materialwahl und die Austauschzyklen bestimmt wird. Die Wahl der Materialien muss aber nicht in frühen Planungsphasen erfolgen.</p> <p>Bis zu 13 % des GWP entfallen auf diese Kategorie, wobei ca. 40 % in Phase B4 erzeugt wird.</p>	<p>4 bis 18 % der LZK entstehen durch diese Kategorie; die Kosten für die Nutzung übersteigen die Herstellungskosten.</p>
	<b>Einfluss einzelner Parameter</b>	
	<p>Bei hohen Gebäuden wird der Einfluss geringer (&gt;2 Geschosse).</p> <p>Fokus sollte auf Dachabdichtung und -dämmung gelegt werden.</p> <p>Die Materialwahl ist ein wesentlicher Einflussparameter.</p>	<p>Bei hohen Gebäuden wird der Einfluss geringer. Bei einer Geschosshöhe &gt; 3 entfallen ca. 5 % der LZK auf diese Kategorie.</p> <p>Die Nutzungskosten beziehen sich ausschließlich auf Wartungs- und Instandhaltungskosten.</p>

Tabelle 7-10: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Fenster und Türen und Sonstigem (eigene Darstellung)

Bauwerk- oder TGA-Komponenten	Einflussparameter	
	LCA	LCC
<p><b>Fenster/ Türen</b> (Zwei- oder Dreifachverglasungen, Holz-, Aluminium- oder Stahlrahmen, Beschläge, Abdichtungen)</p> <p>(Innen- und Außentüren, Innen- und Außenfenster, transparente Bauteile von Pfosten-Riegel-Fassaden, Glastrennwände)</p>	<p>Der Einfluss der Kategorie Fenster und Türen ist erkennbar, aber verhältnismäßig gering.</p> <p>Am GWP nehmen Fenster und Türen 6 bis 12 % Einfluss; je nach Rahmenmaterial steigt der Anteil am AP auf bis zu 20 %</p> <p>Der Fensterflächenanteil ist eine wichtige Stellschraube, der bereits in frühen Planungsphasen festgelegt wird.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein hoher Fensterflächenanteil bewirkt hohe Umweltwirkungen und hohe Reinigungs- und Instandsetzungskosten.</li> <li>• Es bestehen Wechselwirkungen mit Beleuchtungs-, Kühl- und Sonnenschutzbedarf.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Einfluss einzelner Parameter</b></p> <p>Die Fensterflächen und somit die Umweltwirkungen nehmen mit steigender Geschosshöhe zu.</p> <p>Die Wahl des Rahmenmaterials hat Einfluss auf die Umweltwirkungen (hier: Aluminium).</p>	<p>Die LZK für Fenster und Türen betragen 12 % der Gesamtkosten, wobei in der Nutzungsphase mehr Kosten anfallen als in der Herstellungsphase</p> <p>Zugänglichkeit der Fenster hat Einfluss auf Reinigungskosten.</p>
<p><b>Sonstiges</b> Aluminium-Sonnenschutzlamellen, Textil-Sonnenschutztücher, gelochte Stahlbleche, Absperrgitter von Technikzentralen</p> <p>(Sonnenschutz und Gitter)</p>	<p>Diese Kategorie nimmt am wenigstens Einfluss auf die LCA (&lt; 8 % am GWP, &lt; 9 % und &lt; 14 % am AP) und LCC (&lt; 4 %) und kann in frühen Planungsphasen vernachlässigt werden.</p> <p style="text-align: center;"><b>Einfluss einzelner Parameter</b></p> <p>Einfluss Sonnenschutz kann durch Verringerung der Austauschzyklen und durch Materialwahl reduziert werden.</p> <p>Falls Gitter oder Absturzsicherungen vorhanden sind, nehmen sie innerhalb der Kategorie auf Grund des hohen Metallanteils maßgeblichen Einfluss.</p>	<p>Großer Einfluss auf die Lebenszykluskosten entsteht durch Sonnenschutzsysteme aufgrund ihrer Wartungs- und Instandhaltungskosten.</p> <p>Hohe Kosten für die Reinigung der Sonnenschutzsysteme</p>

Tabelle 7-11: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Technischer Gebäudeausrüstung und betrieblichem Energieeinsatz (eigene Darstellung)

Bauwerk- oder TGA-Komponenten	Einflussparameter	
	LCA	LCC
<p><b>Technische Gebäudeausrüstung</b> (Gas-Brennwertkessel, Wärmepumpen, Pufferspeicher, Lüfter, Solar-Flachkollektoren, Klimageräte, Übergabestation Fernwärmeanschluss)</p> <p>(Fokus: Erzeugeranlagen für Wärme, Warmwasser, Lüftung und Kälte + 20 % Aufschlag auf KG 300 + 400 bei der LCA)</p>	<p>Der Einfluss der TGA ist auf Grund der Datenlage (Ökobaudat und Daten zu Lebenszykluskosten) nicht abschließend quantifizierbar.</p> <p>Die Wahl der TGA hat großen Einfluss auf die Phase B6 (betrieblicher Energieeinsatz) und sollte deshalb in frühen Planungsphasen detailliert betrachtet werden.</p> <p style="text-align: center;"><b>Einfluss einzelner Parameter</b></p> <p>Es gibt erste Hinweise auf den hohen Einfluss von lufttechnischen Anlagen (insbesondere von Lüftungsrohren).</p>	<p>Instandhaltung und Wartung der TGA bedingen hohe Kosten in der Nutzungsphase.</p>
<p><b>Betrieblicher Energieeinsatz</b> (Fernwärme, Strom, Gas, Solarenergie)</p> <p>(Betrieblicher Endenergieeinsatz für Heizung, Warmwasser, Beleuchtung, Lüftung und Kühlung)</p>	<p>Der Energiestandard ist die zweite wesentliche Stellschraube in frühen Planungsphasen.</p> <p>Absoluter Treiber der LCA eines Gebäudes ist der betriebliche Energieeinsatz. Dieser ist stark abhängig von der Wahl der Erzeuger und Energieträger.</p> <p>Anteil an allen ökologischen Indikatoren &gt; 50 % (GWP: &gt; 66 %), auch über unterschiedliche Gebäudelebensdauern hinweg (Projekt A: 68 % bei 30 a bis 79 % bei 80 a)</p> <p style="text-align: center;"><b>Einfluss einzelner Parameter</b></p> <p>Maßgebende Stellschraube ist die Reduzierung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs. Der Heizenergiebedarf ist ausschlaggebend, außer bei 100% erneuerbarer Versorgung.</p> <p>Die Wahl CO<sub>2</sub>-neutraler Energieträger verringert die Umweltwirkungen erheblich.</p> <p>Der Stromverbrauch für Beleuchtung nimmt einen signifikanten Anteil (&gt; 16%) ein.</p>	<p>Die LZK für den betrieblichen Energieeinsatz betragen 16 % bis 30% der Gesamtkosten.</p> <p>Maßgebliche Stellschraube für die Lebenszykluskosten ist hier auf die Kosten für die Energieträger zurückzuführen, da diese einen hohen Einfluss auf die Nutzungskosten haben.</p>

## 7.5 Handlungsempfehlungen

Im Folgenden sind die aus den Projektbeispielen, Variantenstudien und dem Anwendungsbeispiel abgeleiteten strategischen Parameter und Optimierungspotentiale für Umweltwirkungen und Lebenszykluskosten dargestellt. Sie sind in die Themen Konstruktion (KG 300, LZPH A1-A3, B4, C1-C3, Abbildung 7-19 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) und Betrieb (LZPH B6, Abbildung 7-20 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) aufgeteilt. Über die TGA lassen sich aufgrund der ungenügenden Datenlage keine verallgemeinerbaren Aussagen treffen. Die Empfehlungen gelten allgemein für eine Schwerpunktsetzung bei der Optimierung der Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen.

Selbstverständlich bestehen zwischen den Kategorien Konstruktion und Betrieb Wechselwirkungen, die bei einer Gesamtstrategie beachtet werden müssen. Vorrangig zu nennen ist hier der Fensterflächenanteil: Ein geringer Fensterflächenanteil bedingt in der Regel geringe Lebenszykluskosten und geringe Umweltwirkungen der Konstruktion. Im Betrieb allerdings wirkt er sich negativ aus die Belichtung mit Tageslicht aus und erhöht damit den Energiebedarf für die Beleuchtung und verringert den Innenraumkomfort. Umgekehrt sollte zum Beispiel bei einem hohen Fensterflächenanteil unbedingt ein Sonnenschutz zur Verringerung des Kühlbedarfs und von Blendwirkungen angebracht werden, der wiederum Umweltwirkungen und Lebenszykluskosten für seine Herstellung, Wartung, Instandsetzung und Entsorgung auslöst. Einige Empfehlungen lassen sich unabhängig von der Gebäudegeometrie aussprechen, da sie für alle Büro- und Verwaltungsgebäude gelten. Weitere Prioritäten ergeben sich in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe bzw. Gebäudekompaktheit und Fensterflächenanteil. Die Empfehlungen beruhen auf den in den Kapiteln 7.1 und 7.4 dargestellten Ergebnissen.

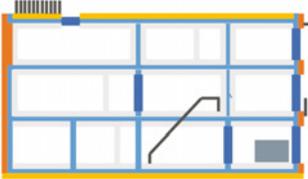
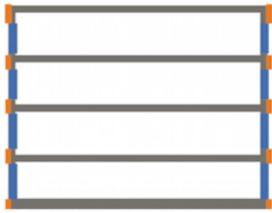
Die Diagramme lesen sich jeweils von links nach rechts. Links sind die Gebäudetypen skizziert, für die die Empfehlungen gelten. Davon ausgehend sind Prioritäten, Strategien und die Auswirkung einer Optimierung auf das Gesamtergebnis qualitativ dargestellt.

Beim Betriebsenergiebedarf sollte zunächst der Heizenergiebedarf minimiert werden. In zweiter Linie, abhängig von Gebäudekompaktheit und Fensterflächenanteil entweder der Kühlbedarf oder der Beleuchtungsbedarf. Die gleichen Prioritäten gelten für die Wahl der Versorgung. Rechts sind qualitativ die Umweltwirkungen und Lebenszykluskosten für unterschiedliche Versorgungsarten dargestellt.

Bei der Konstruktion sollte zuerst das Tragwerk hinsichtlich der Umweltwirkungen und der Innenausbau hinsichtlich Lebenszykluskosten betrachtet werden. Darauf folgend sollte jeweils die andere Kategorie auf weitere Optimierungspotenziale untersucht werden. Synergien ergeben sich bei der Wahl von Materialien mit langer Lebensdauer für den Innenausbau und bei der Optimierung des Materialbedarfs für das Tragwerk. An zweiter, untergeordneter Stelle werden bei niedrigeren Gebäuden Dämmung / Abdichtung Dach und Fundament und Fenster und Türen empfohlen, bei hohen Gebäuden die Fassade und ebenfalls Fenster und Türen. In der rechten Spalte lässt sich qualitativ das Einsparpotenzial ablesen.

Folgende Seiten:

Abbildung 7-19: Strategie zur Optimierung von LCA und LCC für die Konstruktion (eigene Darstellung)

GEBÄUDETYP	STRATEGISCHER PARAMETER 1	STRATEGIE
<p>1</p>  <p>ALLE GEBÄUDE</p>	<p><b>Tragwerk</b></p> <p>LCA</p> <p>LCC</p> <p><b>Innenausbau</b></p>	<p>Materialwahl: nachwachsende Rohstoffe</p> <p>Optimierung Statik: <u>Materialeinsparung</u></p> <p>Materialwahl: <u>lange Lebensdauer</u> einfache Reinigung</p> <p>Einbau: unaufwendige Austauschbarkeit</p>
<p>2A</p>  <p>NIEDRIGE GEBÄUDE</p>	<p>LCA</p> <p>LCC</p> <p><b>Dämmung / Abdichtung Dach und Fundament</b></p>	<p>Materialwahl: <u>lange Lebensdauer</u> und / oder wenig Umweltwirkungen</p> <p>Materialwahl: Rückbau- und Recyclingfähigkeit <u>lange Lebensdauer</u> und / oder geringe Investitionskosten</p>
<p>2B</p>  <p>HOHE GEBÄUDE</p>	<p>LCA</p> <p>LCC</p> <p><b>Fassade mit Außen-dämmung Abdichtung</b></p> <p><b>Fenster und Türen</b></p>	<p>Materialwahl: nachwachsende Rohstoffe und / oder hohes Recycling-potenzial</p> <p>Einbausituation: einfache Reinigung</p>

STRATEGISCHER PARAMETER 2	STRATEGIE	POTENZIAL
<p><b>Innenausbau</b></p> <p><b>Tragwerk</b></p>	<p>Materialwahl:  <u>lange Lebensdauer</u>                      nachwachsende Rohstoffe                      Materialien mit wenig Umweltwirkungen                      Wiederverwendbarkeit</p> <p>Materialwahl:                      geringe Investitionskosten</p> <p>Optimierung Statik:  <u>Materialeinsparung</u></p>	
<p><b>Fenster und Türen</b></p>	<p>Optimierung Fensterflächenanteil                      Achtung: Wechselwirkung mit Gebäudebetrieb:                      Tageslicht, Kühlung!</p> <p>Materialwahl:                      Rahmen aus nachwachsenden Rohstoffen und / oder mit hohem Recyclingpotenzial</p> <p>Einbausituation:                      einfache Reinigung</p>	
<p><b>Fenster und Türen</b></p> <p><b>Fassade mit Außen-dämmung Abdichtung</b></p>	<p>Optimierung Fensterflächenanteil                      Achtung: starke Wechselwirkung mit Gebäudebetrieb:                      Tageslicht, Kühlung!</p> <p>Materialwahl:                      Rahmen aus nachwachsenden Rohstoffen und / oder mit hohem Recyclingpotenzial</p> <p>Materialwahl:  <u>lange Lebensdauer</u></p> <p>Einbausituation:                      einfache Reinigung</p>	

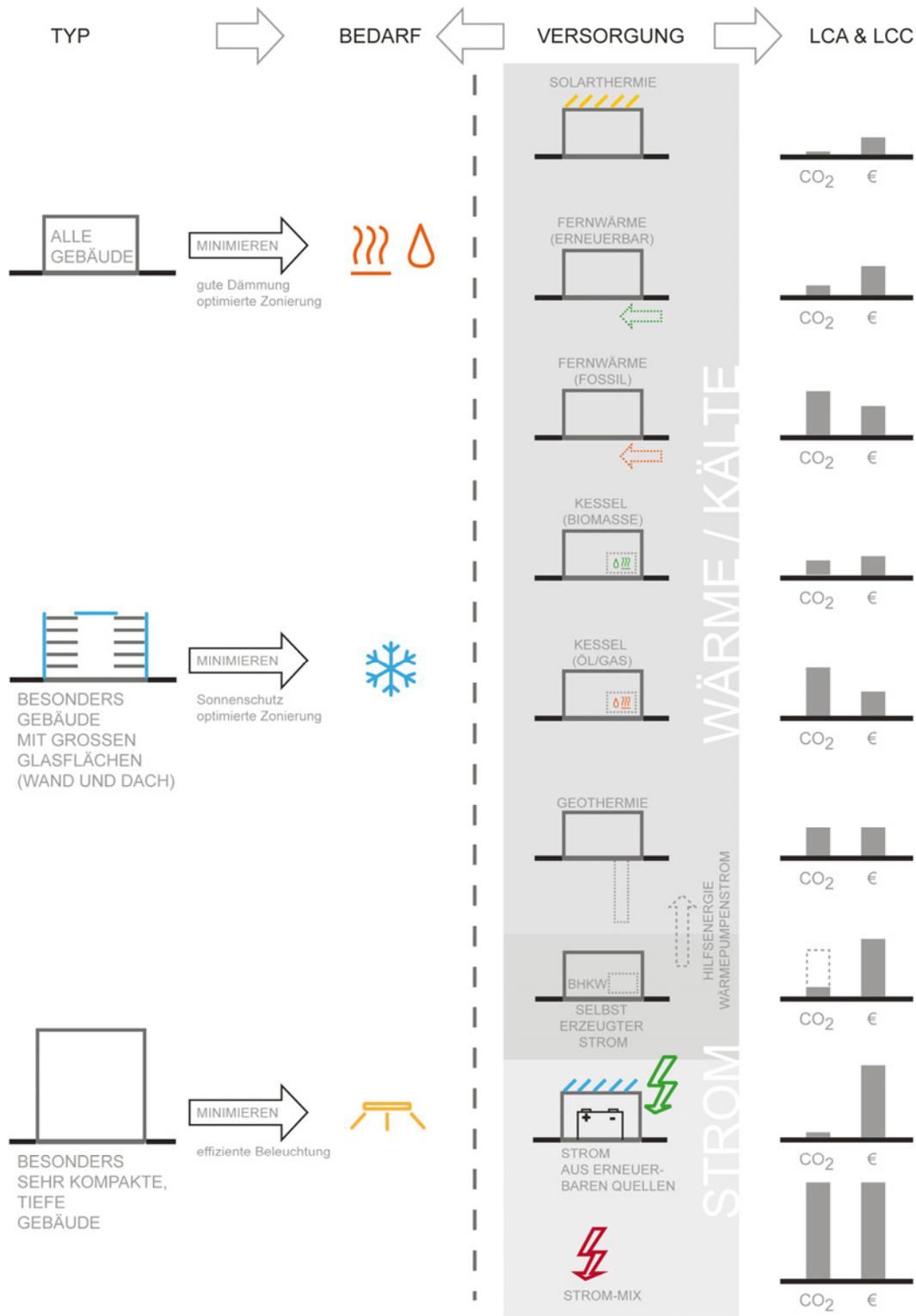


Abbildung 7-20: Strategie zur Optimierung von LCA und LCC für die LPH B6 (Gebäudebetrieb) (eigene Darstellung)

Zusätzlich lassen sich für die am Bau Beteiligten folgende Empfehlungen aussprechen:

**Bauherren / Investoren:**

Ein Bauherr, der an einer Optimierung der Umweltwirkungen und Kosten über den Lebenszyklus seines Gebäudes interessiert ist, kann die Qualität des Projektes fest. Um allerdings verwendbare Zielvorgaben machen zu können, benötigt er die Unterstützung des gesamten Planungsteams, das Informationen zu den Möglichkeiten für Ziele und Strategien zur Zielerreichung bereitstellen muss. Der Bauherr muss sich darüber hinaus darauf einlassen, Planungskosten und -zeit schon zu einem früheren Zeitpunkt im Planungsprozess als bei einem Standardprojekt zu investieren, um Variantenstudien und eine integrale Planung zu ermöglichen.

**Planer:**

Sowohl Architekten als auch beratende Ingenieure haben die Aufgabe, den Bauherren von Beginn an über Möglichkeiten der integralen Planung, der Zielsetzung und von Variantenstudien zu informieren. Die im Projekt entwickelte Methodik der Hochrechnung kann für Variantenstudien angewendet werden. Dabei dienen die Ergebnisse der Variantenstudien als Vergleichswerte für weitere Studien. Sie können für eine Weiterentwicklung der Methodik verwendet werden, um die Bandbreite der Ergebnisse und das Reduktionspotenzial für Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen noch differenzierter darstellen zu können. Grundsätzlich sollte nach den auf den vorangegangenen Schaubildern gezeigten Prioritäten und Strategien vorgegangen werden. Wichtig ist darüber hinaus die Feststellung von Synergien (z.B. lange Lebensdauer) und Widersprüchen (z.B. geringe Investitionskosten bei hohen Umweltwirkungen), um eine ganzheitliche Strategie sicherzustellen.

**Zertifizierungssysteme:**

Für das Projekt wurden Vorgaben für die Berechnung der LCA und LCC in Anlehnung an das BNB bzw. DGNB Zertifizierungssystem festgelegt. Dabei wurden unterschiedliche Berechnungsweisen identifiziert die für die LCA und die LCC nicht analog festgelegt sind. Hierbei sind zum Beispiel die einzubeziehenden Lebenszyklusphasen und Kostengruppen, die festgelegten Lebensdauern und die funktionalen Einheiten der Ergebnisdarstellung (pro m<sup>2</sup> NGF und Jahr bzw. pro m<sup>2</sup> NGF) zu nennen. Um eine einheitliche Betrachtungsweise sicherzustellen, sollte an der Angleichung der Randbedingungen gearbeitet und die entsprechenden Daten zur Verfügung gestellt werden.



## 8 Fazit und Ausblick

Insgesamt ergeben die gewählten Beispielprojekte ein einheitliches Bild der Umweltwirkungen über den Lebenszyklus und der Lebenszykluskosten. Auf Bürogebäude, die ähnlich konstruiert sind, d.h. keine auffälligen geometrischen Besonderheiten aufweisen, vergleichbare Nutzungen (Büro, Verwaltung) und vergleichbare Energiestandards (ab EnEV 2009) aufweisen, können daher die Projektergebnisse übertragen werden.

### 8.1 Fragestellungen und Forschungshypothesen

Bezugnehmend auf die eingangs formulierten Fragestellungen (Kap. 1.1.1) und Forschungshypothesen (Kapitel 1.1.2) sind im Folgenden die Projektergebnisse zusammengefasst.

Die Entscheidungen in frühen Phasen des Planungsprozesses, die den größten Einfluss auf Gesamtbilanz haben, sind die Wahl der Energieversorgung und des Energiestandards, die Wahl des Baumaterials für das Tragwerk und die Wahl des Innenausbaukonzeptes. Letzteres ist besonders relevant für die Lebenszykluskosten. Dabei geht es beim Innenausbaukonzept in frühen Planungsphasen weniger um die konkrete Festlegung der Materialien sondern vielmehr um Überlegungen zu verschiedenen Materialkonzepten, um Austauschraten und Reinigungskosten gering zu halten.

Die entwickelte Methodik der Hochrechnung aus wenigen Bauteilen dient zur Schaffung von nachvollziehbaren und praxisnahen Entscheidungsgrundlagen zur Abschätzung der langfristigen Qualität verschiedener Gebäudevarianten. Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass es sich um Differenzbetrachtungen handelt, so dass beurteilt werden kann, welche Varianten besser oder schlechter in der Ökobilanz und in den Lebenszykluskosten abschneiden. Absolute Werte können auf diese Weise nicht ermittelt werden. Als Grundlage dient die Identifizierung der strategischen Parameter, für die in frühen Planungsphasen Variantenstudien durchgeführt werden sollten: die Energieversorgung hat wesentlichen Einfluss auf ökologische und ökonomische Qualitäten, ebenso wie das Tragwerk, bei dem je nach Gebäudetyp unterschiedliche Elemente der Konstruktion ausschlaggebend für die Ökobilanz sind, während besonders die Reinigungsfreundlichkeit der Oberflächen die Lebenszykluskosten beeinflusst.

Zusätzlich wird die Wichtigkeit von Zielvereinbarungen zu Projektbeginn deutlich: Nur wenn Bauherren und Planer klare ökonomische und ökologische Ziele formulieren, die Nutzungszeitraum und Prioritäten hinsichtlich Energieversorgung und Materialien einschließen, kann sinnvoll optimiert werden. Ansonsten besteht die Gefahr, sich in der Vielfältigkeit der Möglichkeiten zu verlieren.

Wichtig für die Zusammenführung von Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen von Gebäudevarianten, um beide schon in frühen Planungsphasen parallel zu optimieren, ist vor allem die Wahl einer gemeinsamen Bezugsgröße und einheitlicher Berechnungsweisen. Im vorliegenden Projekt wurde als Bezugsgröße Nettogrundfläche ( $m^2_{NGF}$ ) und Jahr gewählt, da die NGF die gängige Größe in der Planung ist. Der spezifische Bezug ermöglicht es, einzelne Gebäudequalitäten miteinander zu vergleichen.

Die entwickelte Methode der Hochrechnung bietet das Potenzial, durch Anwendung auf laufende Projekte validiert und geschärft zu werden.

Die durchgeführten Variantenstudien und Hochrechnungen zeigen, dass in der systematischen Information des Planungsprozesses großes Potential liegt, die ökologische Qualität für den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu verbessern, ohne dabei an ökonomischer Qualität einzubüßen. Die Identifikation strategischer Parameter erlaubt es durch die Berechnung der mit ihnen verbundenen Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen, mit vertretbarem Aufwand Unterschiede zwischen Gebäudevarianten festzustellen. Dadurch lassen sich Verbesserungsvorschläge mit geringem Rechenaufwand evaluieren.

## 8.2 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die LCA- und LCC-Bilanzierung der Beispielprojekte und die damit zusammenhängenden Variantenstudien zeigen bei der LCA eine deutliche Dominanz der Betriebsphase, die mehr als 51 % des AP und im Durchschnitt 74 % des Treibhauspotenzials über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren verursacht (Kapitel 5.1.3). Auch für die LCC ist die Betriebsenergie mit 16 % bis 30 % der Lebenszykluskosten ein deutlicher Faktor (Kapitel 5.2.4). Die Investitionskosten betragen 32 % - 37 % und liegen damit noch unter den zusammengefassten Nutzungskosten (ohne Betriebsenergie) von 32 % – 47 % der Lebenszykluskosten (Kapitel 5.2.4). Die aus den Ergebnissen der LCA berechneten ökologischen Kosten auf der Basis der Eco-Costs zeigen einen parallelen Zusammenhang: die Eco-Costs der Betriebsphase betragen mehr als 45 % der Betriebskosten, da diese Phase die Umweltwirkungen, aber nicht die LZK dominiert. Die Eco-Costs der Konstruktion betragen dagegen nur ca. 5 % der Lebenszykluskosten der Konstruktion (Kapitel 5.3).

Daraus ergibt sich die klare Empfehlung, mit Bauherren frühzeitig Energieversorgungskonzepte in die Planungsüberlegungen mit aufzunehmen und durch projektspezifische Variantenstudien zu untersuchen. Ziel sollte es sein, den Energiestandard der EnEV zu übertreffen und einen möglichst hohen Anteil der Versorgung aus regenerativen Quellen zu erreichen. Eine unabdingliche Hilfestellung ist es dabei, in frühen Planungsphasen klare Zielvereinbarungen zu treffen. Hier können Stichworte wie „klimaneutrales Gebäude“, „lebenszyklusbasiertes Plusenergiegebäude“, „Eigenversorgung mit regenerativer Energie“, „Maximierung nachwachsender Rohstoffe“ eine Hilfestellung geben.

Um Zusammenhänge und strategische Parameter des Anteils der Konstruktion an LCA und LCC festzustellen, sind die Ergebnisse jeweils nach Kostengruppen und nach funktionalen Kategorien aufgeschlüsselt. Unter den funktionalen Kategorien zeigt sich für die LCA das Tragwerk als der größte Faktor, danach der Innenausbau. Die Lebenszykluskosten werden primär durch den Innenausbau bestimmt (Kapitel 7.1), gefolgt vom Tragwerk. Daraus ergibt sich für den Architektorentwurf, alternative Tragwerkmaterialien in Betracht zu ziehen und die Massen des Tragwerkes zu minimieren. So können ggf. bei einem Tragwerk aus Stahlbeton Massen durch die Ausführung in Stahlbetonskelettbauweise eingespart werden. Auch hybride Bauweisen, wie die Kombination aus Stahlbeton und Holz des Fallbeispiels „Projekt X“, sollten in die Überlegungen mit einbezogen werden (Kapitel 7.5). Grundsätzlich verringert eine lange Nutzungsdauer des Tragwerkes die auf das Jahr bezogenen Umweltwirkungen

und Lebenszykluskosten. Daher sind Anpassungsfähigkeit und Langlebigkeit der Funktionsverteilungen im Gebäude sowohl für die LCA als auch für die LCC von großem Vorteil.

Für den Innenausbau ist die Wahl robuster Materialien, die wartungs- und reinigungsfreundlich sind und selten ausgetauscht werden müssen, zur Minimierung von Umweltwirkungen und LZK am wichtigsten. Hinsichtlich der LZK gilt, dass insbesondere die Nutzungskosten des Innenausbaus steuerbar sind. Darüber hinaus können die LZK für Fenster und Türen durch die Wahl langlebiger und pflegeleichter Materialien deutlich reduziert werden.

Um die genauen Auswirkungen der Materialwahl auf die LCA und LCC der Konstruktion frühzeitig beurteilen zu können, sollten alternative Materialkonzepte in frühen Planungsphasen mit Hilfe der entwickelten Hochrechnungsmethode untersucht werden.

Wird wie im Forschungsprojekt das GWP als Hauptindikator für die LCA verwendet, empfiehlt sich der Einsatz nachwachsender Rohstoffe zu einem hohen Anteil.

Die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) erweist sich als schwierig zu beurteilende Größe, da die Datenlage noch sehr lückenhaft ist. Die Berechnung der Energieträger plus 20 % der Umweltwirkungen der Konstruktion ergibt für die LCA einen hohen Anteil an den Gesamtumweltwirkungen (Kapitel 7.1). Die detaillierte Betrachtung eines Projektes zeigt, dass die tatsächlichen Umweltwirkungen deutlich höher liegen können (Kapitel 6.3), besonders aufgrund der Lüftung (KG 430). Hier wird viel Metall verbaut, das grundsätzlich hohe Umweltwirkungen besitzt; Die Lebenszykluskosten von gebäudetechnischen Anlagen sind hochkomplex und durch die Gebäudegeometrie und -nutzung beeinflusst. Die Art der Anlage und die Versorgung des Gebäudes weisen bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten große Unterschiede auf und sollten deshalb mit Fachplanern und auf der Basis von Normen betrachtet werden. Um eine lebensdauerspezifische Differenzbetrachtung der Investitions- und Nutzungskosten durchführen zu können, muss in frühen Planungsphasen der Energiebedarf von Gebäuden abgeschätzt werden. Demnach sollten in frühen Planungsphasen auch verschiedene Lüftungskonzepte betrachtet werden

Für die LCC spielt die TGA eine eher untergeordnete Rolle, die Betrachtung schließt allerdings nur die Energieerzeuger mit ein, um eine vergleichbare Datengrundlage zur LCA zu schaffen. Die hohen Kosten in der Nutzungsphase ergeben sich aus dem hohen Wartungsaufwand technischer Anlagen und auf der Basis geringer Lebensdauern der Komponenten. Auch hier besteht Forschungsbedarf für eine differenziertere Beurteilung unterschiedlicher Versorgungssysteme, um auf der Basis der Energieerzeuger und von prozentualen Aufschlägen eine Aussage über die gesamten Lebenszykluskosten der KG 400 geben zu können. Um diese Ungenauigkeit in der Datenerhebung ausklammern zu können, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts die Betrachtung von Differenzkosten angewandt. Durch diese Methoden werden ausschließlich die Unterschiede von zwei oder mehr Varianten zueinander bewertet und die Verteilung als gleichbleibend und somit vernachlässigbar betrachtet.

Die Durchführung von bauteilbezogenen Hochrechnungen der LCA in frühen Planungsphasen wird durch das eLCA-Tool wesentlich erleichtert, da es für eine schnelle Erstellung von Bauteilaufbauten sehr gut geeignet ist. Da im eLCA-Tool für die LCC eigene Kostenkennwerte eingegeben werden müssen, ist es derzeit für eine Berechnung der LZK in frühen Planungsphasen nur bedingt geeignet. Die Hinterlegung von Kostenkennwerten für die Materialien der Ökobaudat würde die LCC für Bauteile auch

in frühen Planungsphasen ermöglichen, so dass auch für die LZK eine einfache Hochrechnung möglich wäre.

### 8.3 Weiterer Forschungs- bzw. Untersuchungsbedarf

Im Laufe des Forschungsprojektes werden mehrere Themen identifiziert, zu denen weiterer Forschungsbedarf besteht: Es fehlen detaillierte Betrachtungen und Datensätze zu den Lebenszyklusphasen B6, C und D sowohl für die LCA als auch die LCC. Um materialspezifische Vorteile besser nutzen und darstellen zu können, bedarf es differenzierteren Angaben zu ihren Nutzungszyklen. Außerdem muss die Struktur des Planungsprozesses neu überdacht werden, um Zieldefinitionen und Variantenstudien besser in diesen Prozess einbinden zu können.

Bei den Lebenszyklusphasen sind in erster Linie die Phasen C1 bis C4 und D zu nennen. Besonders die Phase D hat entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz (vgl. Kapitel 7.3.2.1). Sie ist geeignet, um in Zukunft positive Effekte auf LCA und LCC von kreislauffähigen Bauweisen und Gebäudeteilen nachzuweisen. Derzeit sind zum Beispiel Vorhangfassaden in der LCA schlecht bewertet, wenn die Phase D und damit ein Recycling von Metallunterkonstruktionen oder wiederverwendbaren Fassadenverkleidungen nicht in die Überlegungen mit einbezogen werden. Der Vorteil des nachwachsenden Rohstoffes Holz als Kohlenstoffspeicher wird durch den Ausschluss der Phase D im Vergleich zu fossilen Stoffen in der LCA nicht sichtbar. Auch hinsichtlich der Lebenszykluskosten besteht Forschungsbedarf zu Rückbaukosten und Entsorgungsszenarien. Szenarien für Gutschriften für die Wiederverwendung und das Recycling von Materialien sollten untersucht werden, ebenso wie die Entwicklung von Geschäftsmodellen für Materialkreisläufe im Bauwesen.

Bei der Phase B6 (Gebäudebetrieb) besteht Forschungsbedarf für detaillierte Variantenstudien für Büro- und Verwaltungsgebäude. Geometrie, Fensterflächen-Anteil, Qualität der Gebäudehülle, Sonnenschutz und Versorgung von Beispielprojekten sollten kombiniert und variiert werden, um z.B. in Abhängigkeit von Gebäudeform, Nutzung und Zonierung die strategischen Parameter für die LCA und LCC zu identifizieren. Obwohl diese Untersuchung nicht Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojektes ist, wurde ein hoher Bedarf identifiziert, da sich die Phase B6, trotz hoher Energiestandards der Beispielprojekte, als wesentliche Stellschraube der Umweltwirkungen und Kosten über den Lebenszyklus darstellt.

In diesem Zusammenhang besteht auch großer Forschungsbedarf zu den Daten der TGA sowohl für die LCA als auch für die LCC. Dabei existieren zum einen Wechselwirkungen mit den oben beschriebenen Varianten zur Phase B6, zum anderen werden vereinfachte LCA-Kennwerten für Leitungen und ggf. Verteiler der HLSE-Anlagen benötigt. Für die LZK fehlen anlagenspezifische Wartungs- und Instandsetzungskosten. Es zeigt sich, dass die Umweltwirkungen und die LZK der TGA im Projekt unterrepräsentiert sind, da eigenen und referenzierten Fallstudien zufolge LZK und Umweltwirkungen bedeutend höher liegen können (vgl. Kapitel 6.3 und 5.2.5.7).

Die Qualität von Hochrechnungen in frühen Planungsphasen kann durch die Entwicklung vereinfachter Kennwerte und transparenter Bauteilkataloge für die KG 300 und 400 erhöht werden. Dadurch kann der Zeitaufwand für die Erhebung der Daten minimiert werden und diese Methode verbreitet im Planungsprozess Anwendung finden.

Allgemein wurde die Bilanzierung der LCA und LCC durch mangelnde Datensätze, sowohl bei gängigen Materialien (z.B. Schaumglas, Teppich) als auch bei nicht gängigen Materialien (z.B. Kautschuk- oder Vinyl-Bodenbeläge) erschwert. Es mussten Annahmen getroffen werden, die u.U. stark von den tatsächlichen Gegebenheiten abweichen können. Hier bedarf es dringend weiterer Untersuchungen und der Förderungen besonders von herstellerneutralen Materialdatensätzen.

Außerdem zu nennen ist die Datenerhebung und die Datensätze für Pfosten-Riegel-Fassaden, da hier zahlreiche Vorsprünge, Sonderbauteile, Einbauten und Verbindungsmittel zu berücksichtigen sind. Besonders für frühe Planungsphasen wären weitere Datensätze hilfreich, die beispielsweise Zuschläge für Verbindungsmittel usw. enthalten. Auch in der Datenlage zu Metallen wurden Lücken identifiziert, die im Büro- und Verwaltungsbau großen Einfluss auf die Ergebnisse der LCA haben können, bei dem der Metallanteil aufgrund der TGA und aufgrund gängiger Fassadensysteme relativ hoch ist. Metalle werden in der Ökobaudat sehr ungünstig bewertet, da Datensätze zur Verwendung von recycelten Metallen fehlen und oft keine spezifischen Werte für die Phase D vorhanden sind (z.B. für Aluminium-Fensterrahmen).

Forschungsbedarf besteht darüber hinaus in der Entwicklung einer Methodik, die flächendeckend gültige und aktuelle Kostenkennwerte als Grundlage für die LCC in frühen Planungsphasen bereitstellt. Obwohl die verwendete Software Legep eine sehr gute Grundlage bietet, waren die Kosten oftmals zu Elementen und Positionen zusammengefasst. Beispielsweise Wartungs- und Entsorgungskosten werden nur für das Gesamtgebäude berechnet, so dass der Anteil einzelner Schichten nicht genau zugeordnet werden konnte.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde mit den Standard-Nutzungsdauern von Baustoffen gearbeitet, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Dies führt allerdings dazu, dass Baustoffe, die nicht zerstörungsfrei entfernt werden können (z.B. die Dämmung unter einer Bodenplatte) rechnerisch für die LCA und LCC ausgetauscht werden, obwohl dies konstruktiv nicht möglich ist. Hier besteht Untersuchungsbedarf zu den Auswirkungen von Einbausituationen, so dass auch rechnerisch nur Bauteile und Bauteilschichten im Ganzen ausgetauscht werden können.

Der Analyseprozess der Projekte zeigt darüber hinaus die Komplexität der Interpretation von LCA Ergebnissen, besonders in frühen Planungsphasen. Die Komplexität wurde durch eine Auswahl von Leitgrößen (GWP, PENRT, AP) reduziert. Die Anwendung der monetären Bewertung der Umweltwirkungen zeigt Potenzial, muss aber in weiterer Forschung näher untersucht werden. Es besteht in jedem Fall Bedarf, aus den Indikatoren der LCA einen leichter zu interpretierenden Ansatz (z.B. analog der Schweizer Methode der ökologischen Knappheit) für die Planungsphase zu entwickeln. Hierfür müssten über Grenzwerte für das Treibhauspotenzial hinaus auch für die weiteren Indikatoren der LCA (gesetzliche) Benchmarks entwickelt werden.

Die Erfahrung mit dem im Projekt verwendeten Fallbeispiel zeigt, dass für eine frühe Optimierung von ökologischen und ökonomischen Auswirkungen eines Gebäudes der Planungsprozess umstrukturiert werden muss, um die Integration von Variantenstudien und Hochrechnungen zu ermöglichen. Dabei verlagern sich Planungsleistungen auf immer frühere Zeitpunkte im Planungsprozess, um eine interdisziplinäre Diskussion zu ermöglichen. Manche Entscheidungen, die im traditionellen linearen Planungsprozess erst spät gefällt wurden, wie zum Beispiel die Wahl der Energieversorgung, müssen früher untersucht und abgefragt werden. Dieser Prozess verlangt zunehmend nach einem Denken in Konzepten (z.B. Materialkonzept, Energiekonzept),

die jeweils die Zusammenarbeit von Projektbeteiligten mit unterschiedlicher Spezialisierung erfordern. Es besteht Forschungsbedarf darin, dies systematisch anhand einer größeren Anzahl von Beispielprojekten zu strukturieren und zu erproben. Die im Projekt dargestellten Handlungsempfehlungen und die entwickelte Methodik der Hochrechnung bieten Anknüpfungspunkte zur Anwendung und Verfeinerung in zukünftigen Projekten.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Gegenseitige Beeinflussung und Abhängigkeiten exemplarischer Projektparameter (eigene Darstellung) .....	4
Abbildung 1-2: Arbeitspakete des Forschungsprojektes (eigene Darstellung).....	4
Abbildung 3-1: Berücksichtigte Lebenszyklusphasen des Gesamtgebäudes nach DIN EN 15978 für LCA und LCC (eigene Darstellung nach DIN EN 15978, 2012, Bild 6) .....	15
Abbildung 3-2: Berücksichtigte Lebenszyklusphasen je Kostengruppe bei der LCA bzw. LCC (eigene Darstellung nach DIN EN 15978:2012-10, Bild 6) .....	19
Abbildung 3-3: Zuordnung der in den Projekten identifizierten Kostengruppen nach DIN 276-1:2008-12 zu den funktionalen Kategorien (eigene Darstellung).....	24
Abbildung 4-1: Gebäudeschema Projekt A (eigene Darstellung).....	26
Abbildung 4-2: Gebäudeschema Projekt B (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 4-3: Gebäudeschema Projekt C (eigene Darstellung).....	27
Abbildung 4-4: Gebäudeschema Projekt D (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 4-5: Gebäudeschema Projekt E (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 5-1: LCA Projektergebnisse – kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> je funktionaler Kategorie und Lebenszyklusphase (LZPH) (eigene Darstellung).....	34
Abbildung 5-2: LCA Projektergebnisse – kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> je LZPH innerhalb der funktionalen Kategorien; spezifisch und prozentual (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 5-3: LCA Projektergebnisse – MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> je funktionaler Kategorie und Lebenszyklusphase (LZPH) (eigene Darstellung).....	36
Abbildung 5-4: LCA Projektergebnisse – MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> je LZPH innerhalb der funktionalen Kategorien; spezifisch und prozentual (eigene Darstellung).....	37
Abbildung 5-5: LCA Projektergebnisse – kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> je funktionaler Kategorie und Lebenszyklusphase (LZPH) (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 5-6: LCA Projektergebnisse – kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> je LZPH innerhalb der funktionalen Kategorien; spezifisch und prozentual (eigene Darstellung).....	39
Abbildung 5-7: LCA Projektergebnisse – GWP in kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 5-8: LCA Projektergebnisse – GWP in kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> der Phase B6 aufgeteilt nach Energiebedarf und Energieträgern (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 5-9: LCA Projektergebnisse – PENRT in MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung) .....	41
Abbildung 5-10: LCA Projektergebnisse – PENRT in MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> der Phase B6 aufgeteilt nach Energiebedarf und Energieträgern (eigene Darstellung) .....	42
Abbildung 5-11: LCA Projektergebnisse – AP in kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFA</sub> aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung) .....	43

Abbildung 5-12: LCA Projektergebnisse – AP in kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> der Phase B6 aufgeteilt nach Energiebedarf und Energieträgern (eigene Darstellung) .....	43
Abbildung 5-13: Vergleich der LCC nach funktionalen Kategorien und nach Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 5-14: Vergleich der nach Lebenszyklusphasen und funktionalen Kategorien aufbereiteten Lebenszykluskosten (eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 5-15: Vergleich der prozentualen Anteile der Lebenszyklusphasen an der LCC (eigene Darstellung).....	54
Abbildung 5-16: Verteilung der LCC im Bereich der Nutzungsphase (eigene Darstellung) .....	55
Abbildung 5-17: Auswertung der Rückbaukosten für die Instandhaltung und für den Abbruch am Lebensende (eigene Darstellung).....	56
Abbildung 5-18: Prozentuale Auswertung der Kosten in den einzelnen Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung).....	57
Abbildung 5-19: Eco-Costs der KG 300 pro m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> und Jahr (eigene Darstellung)...	60
Abbildung 5-20: Externe Kosten der KG 300 pro m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> und Jahr (eigene Darstellung) .....	60
Abbildung 5-21: Externe Kosten der KG 300 pro m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> und Jahr, gerechnet mit dem Maximalwert für von 0,28 € pro kg CO <sub>2</sub> -Äq. (eigene Darstellung).....	61
Abbildung 5-22: Eco-Costs der KG 300 im Vergleich zu den Lebenszykluskosten der KG 300 pro m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> und Jahr (eigene Darstellung).....	62
Abbildung 5-23: Eco-Costs Betrieb im Vergleich zu den Betriebskosten pro m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> und Jahr (eigene Darstellung) .....	62
Abbildung 6-1: Einfluss der Nutzungsdauer des Gebäudes bzw. der Austauschzyklen – kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> des Projektes A (eigene Darstellung).....	64
Abbildung 6-2: Grundrisschema der gewählten Typräume, inkl. der Flächenverteilungen (eigene Darstellung).....	66
Abbildung 6-3: Differenzbetrachtung Gebäudelebensdauer GWP – kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> der gewählten Typräume (eigene Darstellung).....	68
Abbildung 6-4: Differenzbetrachtung Gebäudelebensdauer PENRT – MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> der gewählten Typräume (eigene Darstellung).....	69
Abbildung 6-5: Differenzbetrachtung Gebäudelebensdauer AP – kg SO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> der gewählten Typräume (eigene Darstellung) .....	69
Abbildung 6-6: Auswertung der Auswirkungen von unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen von Gebäuden auf die jährlichen Lebenszykluskosten in den funktionalen Kategorien und den Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung).....	71
Abbildung 6-7: Auswertung der Auswirkungen von unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen von Gebäuden unter Berücksichtigung der jährlichen Kosten (eigene Darstellung) .....	72
Abbildung 6-8: Abweichung der jährlichen Lebenszykluskosten bezogen auf die Standardberechnung mit dem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren .....	73

Abbildung 6-9: Verteilung des GWP pro m <sup>2</sup> NGF und Jahr in den Szenarien mit einer Auswertung nach funktionalen Kategorien (eigene Darstellung) .....	74
Abbildung 6-10: Verteilung der Lebenszykluskosten pro m <sup>2</sup> NGF und Jahr in den Szenarien mit einer Auswertung nach funktionalen Kategorien (eigene Darstellung) .....	75
Abbildung 6-11: Prozentuale Massenverteilung der KG 410 (Stoiber, 2018).....	77
Abbildung 6-12: Prozentuale Massenverteilung der KG 420 (Stoiber, 2018).....	77
Abbildung 6-13: Prozentuale Massenverteilung der KG 430 (Stoiber, 2018).....	77
Abbildung 6-14: Vergleich der Beispielprojekte hinsichtlich GWP, AP, PENRT Eco-Costs und Kosten der Phase B6 (relative Werte, eigene Darstellung).....	80
Abbildung 6-15: Variantenvergleich GWP (eigene Darstellung) .....	83
Abbildung 6-16: Variantenvergleich AP (eigene Darstellung) .....	84
Abbildung 6-17: Variantenvergleich Eco-Costs .....	84
Abbildung 6-18: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 320; Beschreibung der Regelaufbauten siehe Anhang A2 (eigene Darstellung) .....	87
Abbildung 6-19: GWP der Regelaufbauten A, C und E, Kostengruppe 330 (eigene Darstellung).....	88
Abbildung 6-20: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 334 (eigene Darstellung).....	89
Abbildung 6-21: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 340 (eigene Darstellung).....	90
Abbildung 6-22: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 350 (eigene Darstellung).....	91
Abbildung 6-23: GWP der Regelaufbauten A,C und E, Kostengruppe 360 (eigene Darstellung).....	92
Abbildung 6-24: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 320 (eigene Darstellung).....	94
Abbildung 6-25: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 330 (eigene Darstellung).....	95
Abbildung 6-26: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 334 (eigene Darstellung).....	96
Abbildung 6-27: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 340 (eigene Darstellung).....	97
Abbildung 6-28: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 350 (eigene Darstellung).....	98
Abbildung 6-29: Lebenszykluskosten der Bauteilvarianten A,C und E, Kostengruppe 360 (eigene Darstellung).....	99
Abbildung 7-1: Strategische Parameter Lebenszykluskosten (LCC) – Darstellung der Projektergebnisse (eigene Darstellung) .....	104
Abbildung 7-2: Strategische Parameter Umweltkosten (Eco-Costs) – Darstellung der Projektergebnisse (eigene Darstellung) .....	105

Abbildung 7-3: Strategische Parameter Treibhauspotenzial – Darstellung der Projektergebnisse (eigene Darstellung) .....	106
Abbildung 7-4: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung des GWP nach Kostengruppen, Projekt A (eigene Darstellung) .....	109
Abbildung 7-5: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung des GWP nach Kostengruppen, Projekt C (eigene Darstellung) .....	110
Abbildung 7-6: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung des GWP nach Kostengruppen, Projekt E (eigene Darstellung) .....	110
Abbildung 7-7: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung der LZK, Projekt A (eigene Darstellung) .....	112
Abbildung 7-8: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung der LZK, Projekt C (eigene Darstellung) .....	113
Abbildung 7-9: Gegenüberstellung der Ermittlung zur Hochrechnung der LZK, Projekt E (eigene Darstellung) .....	113
Abbildung 7-10: Gebäudeschema Projekt X (eigene Darstellung) .....	114
Abbildung 7-11: Projekt X, Vergleich der LCA-Hochrechnung nach Gesamtbilanz und Kostengruppen (eigene Darstellung) .....	118
Abbildung 7-12: Projekt X, Vergleich der LCA-Hochrechnung nach funktionalen Kategorien je $m^2_{NGF}$ und Jahr (eigene Darstellung) .....	118
Abbildung 7-13: Projekt X, Vergleich der LCC-Hochrechnung nach prozentualer Verteilung der Kosten je Kostengruppen (eigene Darstellung) .....	119
Abbildung 7-14: Projekt X, Vergleich der LCC-Hochrechnung nach prozentualer Verteilung der Kosten je funktionaler Kategorie (eigene Darstellung) .....	120
Abbildung 7-15: Projekt X, Differenzbetrachtung von GWP und LZK über den Lebenszyklus (eigene Darstellung) .....	121
Abbildung 7-16: Projekt X, Vergleich der Szenarien Gebäudebetrieb (Szenarien s. Kapitel 6.4.3): Treibhauspotential je $m^2_{NGF}$ und Jahr (eigene Darstellung) .....	122
Abbildung 7-17: Projekt X, Vergleich der Szenarien Gebäudebetrieb (Szenarien s. Kapitel 6.4.3): Versauerungspotential je $m^2_{NGF}$ und Jahr (eigene Darstellung) .....	123
Abbildung 7-18: Projekt X, Vergleich der Szenarien Gebäudebetrieb (Szenarien s. Kapitel 6.4.3): Eco-Costs je $m^2_{NGF}$ und Jahr (eigene Darstellung) .....	124
Abbildung 7-19: Strategie zur Optimierung von LCA und LCC für die Konstruktion (eigene Darstellung) .....	129
Abbildung 7-20: Strategie zur Optimierung von LCA und LCC für die LPH B6 (Gebäudebetrieb) (eigene Darstellung) .....	132

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gewichtung von Ökobilanz-Ergebnissen innerhalb der Bewertungskriterien nach DGNB (Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude 2015.2; ENV 1.1 und ENV 2.1) und BNB (Büro- und Verwaltungsgebäude; 1.1.1 bis 1.1.5 und 1.2.1) (eigene Darstellung).....	10
Tabelle 2-2: Multiplikatoren: Monetäre Bewertung 1 t CO <sub>2</sub> (Quellen: ecocost.com; atmosfair.de; myclimate.org; (jeweils abgerufen am 13.02.2017) Tekie&Lindblad, 2013, S. 40, umgerechnet auf €, UBA, 2012, Anhang B, S.5) .....	11
Tabelle 2-3: Kosten-Multiplikatoren für die Umweltwirkungen (Eco-Costs (Vogtländer, 2018); Externe Kosten (BMVBS, 2010)) .....	12
Tabelle 3-1: Berücksichtigte Kostengruppen nach DIN 276-1:2008-12 (eigene Darstellung).....	18
Tabelle 3-2: Energie- und Medienpreise (BMUB, 2015a) .....	22
Tabelle 3-3: Bewertungsansatz der Rückbaukosten (eigene Darstellung) .....	22
Tabelle 4-1: Übersicht über die zur Analyse der LCC und LCA herangezogenen Büro- und Verwaltungsbauten von ATP sustain GmbH aus den Jahren 2009 - 2017 .....	25
Tabelle 5-1: Projekte A und B: Gesamtergebnisse der LCA je m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> , gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung).....	32
Tabelle 5-2: Projekte C, D und E: Gesamtergebnisse der LCA je m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> , gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung).....	33
Tabelle 5-3: Übersicht über LCC-Projektergebnisse – Durchschnittswerte und prozentuale Spannweiten (eigene Darstellung) .....	47
Tabelle 5-4: Projekte A und B: Gesamtergebnisse der LCC je m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> , gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung).....	48
Tabelle 5-5: Projekte C und D: Gesamtergebnisse der LCC je m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> , gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung).....	49
Tabelle 5-6: Projekt E: Gesamtergebnisse der LCC je m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> , gegliedert nach 2. Kostengruppenebene (eigene Darstellung).....	50
Tabelle 5-7: Durchschnittliche prozentuale Anteile der Lebenszyklusphasen an den Lebenszykluskosten je funktionaler Kategorie inklusive der prozentualen Spannweiten (eigene Darstellung) .....	53
Tabelle 6-1: Vergleich der Projektergebnisse Gesamtgebäude und Typräume - Prozentuale Ab- und Zunahme des kg CO <sub>2</sub> -Äq./m <sup>2</sup> <sub>NGFa</sub> gegenüber den jeweiligen Standardfällen (eigene Darstellung).....	67
Tabelle 6-2: Auswertung der Größe der Nutzungskosten bezogen auf die Investitionskosten (eigene Darstellung) .....	71
Tabelle 6-3: Projektergebnisse der KG 400 nach vereinfachter und genauer Ermittlung: GWP und PENRT (eigene Darstellung nach (Stoiber, 2018)) .....	76

---

Tabelle 6-4: Ergebnisse der EnEV-Berechnungen der Beispielprojekte (eigene Darstellung).....	78
Tabelle 6-5: Mögliche bauliche Einflussgrößen auf den Energiebedarf der Beispielprojekte (eigene Darstellung).....	78
Tabelle 6-6: Energieversorgung (Quelle: Energieberechnungen der Beispielprojekte) .....	80
Tabelle 6-7: Erzeugernutzwärme und -kälte und Strombedarf Beleuchtung (Quelle: Energieberechnungen der Beispielprojekte) .....	81
Tabelle 6-8: Varianten (Ökobaudat-Datensätze (BMI, o.J.)) .....	82
Tabelle 7-1: Prozentuale Abweichungen der Hochrechnung von der Ermittlung der LCA je Kostengruppe (eigene Darstellung).....	108
Tabelle 7-2: Prozentuale Abweichungen der Hochrechnung von der Ermittlung der LZK je Kostengruppe (eigene Darstellung) .....	111
Tabelle 7-3: Wesentliche Änderungen der Regelaufbauten (eigene Darstellung) .	115
Tabelle 7-4: Prozentuale Reduktionspotentiale des GWP je Kostengruppe (eigene Darstellung) .....	117
Tabelle 7-5: Reduktionspotentiale des GWP je funktionale Kategorie (eigene Darstellung) .....	117
Tabelle 7-6: Ergebnisse der EnEV-Berechnungen Projekt X Variante 1 und 2.....	122
Tabelle 7-7: Bauliche Eingabegrößen Projekt X.....	122
Tabelle 7-8: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Tragwerk und Fassade (eigene Darstellung) .....	125
Tabelle 7-9: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Innenausbau, Dämmung (eigene Darstellung) .....	126
Tabelle 7-10: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Fenster und Türen und Sonstigem (eigene Darstellung) .....	127
Tabelle 7-11: Strategische Parameter LCA und / oder LCC von Technischer Gebäudeausrüstung und betrieblichem Energieeinsatz (eigene Darstellung) .....	128

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- (Adensam, Bruck, 2002) Adensam H, Bruck M u.a. (2002) Externe Kosten im Hochbau, Band I-V. Studie im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. Selbstverlag, Wien;
- (Ahbe, Braunschweig, & Müller-Wenk, 1990) Ahbe S., Braunschweig A., & Müller-Wenk R. (1990). *Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- (Ahbe, Schebek, Jansky, Wellge, Weihofen, 2014) Ahbe, S., Schebek, L., Jansky, N., Wellge, S., Weihofen, S. (2014). *Methode der ökologischen Knappheit für Deutschland - Eine Initiative der Volkswagen AG*. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH.
- (Balck, 2012) Balck, H. (2012). *Lebenszyklusorientierte Ausschreibung und Vergabe im Hochbau: methodisch Grundlagen*. Fraunhofer IRB Verlag. Abgerufen von [http://www.irbnet.de/daten/rswb/12069009953 .pdf](http://www.irbnet.de/daten/rswb/12069009953.pdf).
- (BBSR, 2011) Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2011), *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*, Abgerufen von [https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff\\_gebauededaten/BNB\\_Nutzungsdauern\\_von\\_Bauteilen\\_\\_2011-11-03.pdf](https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen__2011-11-03.pdf)
- (BauNetz Media, o.J.) BaunetzMedia (Hrsg.). (o. J.). *Rechtsprechung: Haftung, Lph 1-9, Bausummenüberschreitung, Pflichtverletzung*. Abgerufen am 25.09.2018 von [https://www.baunetz.de/recht/\\_Kein\\_Hinweis\\_auf\\_die\\_Unsicherheit\\_der\\_Kostenschaeetzung\\_Haftung\\_des\\_Architekten\\_\\_220181.html](https://www.baunetz.de/recht/_Kein_Hinweis_auf_die_Unsicherheit_der_Kostenschaeetzung_Haftung_des_Architekten__220181.html)
- (BMI, o.J.) Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. (o.J.). Ökobaudat. Abgerufen von <http://www.oekobaudat.de/>
- (BMU, 2017) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.). (2017). *Bauabfälle*. Abgerufen am 04.09.2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#textpart-1>

- (BMUB, 2015a) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Hrsg.). (2015). Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen – Büro und Verwaltungsgebäude – Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus (BNB\_BN 2.1.1). Abgerufen von [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v\\_2015/BNB\\_BN2015\\_211.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v_2015/BNB_BN2015_211.pdf)
- (BMUB, 2015b) BMUB (2015). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen – Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude: Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen*. Abgerufen von [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v\\_2015/LCA-Bilanzierungsregeln\\_BNB\\_BN\\_2015.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neubau/v_2015/LCA-Bilanzierungsregeln_BNB_BN_2015.pdf)
- (BMUB, 2017) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.). (2017). *Nutzungsdauer von Bauteilen – Stand: 24.02.2017*. Abgerufen von <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebäuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html>
- (BMVBS, 2009) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.). *Leitfaden für Energiebedarfsausweise im Nichtwohnungsbau Ausgabe EnEV 2009*. Abgerufen von [https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/SharedDocs/Downloads/DE/EAAusweisNWG.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/SharedDocs/Downloads/DE/EAAusweisNWG.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- (BMVBS, 2010) Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.), Svend Ulmer, S.; Streck, S.; Sutter, P.: Externe Kosten im Hochbau. BMVBS-Online-Publikation 17/2010
- (BMVIT, 2011) Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.). (2011). *Lebenszykluskosten Prognosemodell: Immobilien-Datenbank-Analysen zur Ableitung lebenszyklus-orientierter Investitionsentscheidungen*. Abgerufen von [https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz\\_pdf/endbericht\\_1137\\_lebenszykluskosten\\_prognosemodell.pdf?m=1469660815](https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/endbericht_1137_lebenszykluskosten_prognosemodell.pdf?m=1469660815)
- (BMVIT, 2014) Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.). (2014). *LEKOECON: Kombiniertes ökonomisch-ökologisches Gebäudelebenszyklusmodell*. Abgerufen von [https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz\\_pdf/berichte/endbericht\\_1449\\_lekoecos.pdf?m=1469660012](https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/berichte/endbericht_1449_lekoecos.pdf?m=1469660012)
- (DGNB, 2018) DGNB. (2018). *ENV1.1: Ökobilanz eines Gebäudes*. Abgerufen am 08.05.2018 von <https://static.dgnb.de/>

- fileadmin/de/dgnb\_system/version2018/02\_ENV1.1\_Oekobilanz-des-Gebaeudes.pdf?m=1526470491&
- (Ecoinvent Association, o.J.) Ecoinvent Association (Hrsg.). (o.J.). *Homepage: Ecoinvent*. Abgerufen am 04.09.2018 von [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- (EEWärmeG, 2015) Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz vom 7. August 2008 (BGBl. I S. 1658), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1722) geändert worden ist  
Abgerufen von: [https://www.gesetze-im-internet.de/eew\\_rmeg/EEW %C3 %A4rmeG.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/eew_rmeg/EEW%C3%A4rmeG.pdf)
- (Hamburg, 2011) Freie und Hansestadt Hamburg (Hrsg.) (2011) LeNA Leitfaden Nachhaltigkeitsorientierte Architekturwettbewerbe.
- (GEFMA 220:2010-09) GEFMA 220:2010-09. Lebenszykluskosten-Ermittlung im FM. GEFMA e.V. Deutscher Verband für Facility Management
- (Goedkoop et al., 2013) Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition (version 1.08)*
- (IBO, 2016) IBO Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH (Hrsg.). (2016). *OI3-Indikator, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, Version 3.1*. Abgerufen von [http://www.ibo.at/de/documents/20160302\\_OI3\\_Berechnungsleitfaden\\_V3.1\\_001.pdf](http://www.ibo.at/de/documents/20160302_OI3_Berechnungsleitfaden_V3.1_001.pdf)
- (ISO 15686-5:2008-06) ISO 15686-5:2008-06. Hochbau und Bauwerke: Planung der Lebensdauer – Teil 5: Kostenberechnung für die Gesamtlebensdauer
- (König, o.J.) König, H. (o.J.). *Legep-Bausoftware*. Abgerufen am 03.09.2018 von <https://lekep.de/>
- (König, 2008) König, H. (2008). *Orientierungswerte für die Bewertung von Hochbauten – erste Stufe: Bürogebäude* (Endbericht). Fraunhofer IRB Verlag. Abgerufen von <http://www.irbnet.de/daten/baufo/20088034503/Endbericht.pdf>.
- (Legep, o.J.a) Legep GmbH (Hrsg.). (o.J.). *Homepage: Legep-Bausoftware*. Abgerufen am 02.06.2017 von <https://lekep.de/>.
- Legep, o.J.b) Legep GmbH (Hrsg.). (o.J.). *Homepage: Legep – FAQ*. Abgerufen am 05.08.2018 von <https://lekep.de/faq-category/legep-lebenszykluskosten/>

- (LeNa, 2016) LeNa (2016). *Kurzbericht Lebenszykluskosten (LCC)*. Abgerufen von [https://www.oew.kit.edu/img/LeNa\\_TP3\\_Kurzbericht\\_LCC\\_fin.pdf](https://www.oew.kit.edu/img/LeNa_TP3_Kurzbericht_LCC_fin.pdf)
- (MEK, 2012) MEK. (Hrsg.). (2012). *Urteile 15.05.2012: Architektenrecht, keine Toleranz bei Kostenüberschreitung*. Abgerufen am 25.09.2018 von <https://www.mek-law.de/aktuelles/e/a/2012/05/keine-toleranz-bei-kostenueberschreitung/>
- (OBB, 2017) Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (Hrsg.), Lang, W., Schneider, P (2017). *Gemeinschaftlich Nachhaltig Bauen - Forschungsbericht der ökologischen Untersuchung des genossenschaftlichen Wohnungsbauprojektes wagnisART*. München
- (Pohl, 2014) Pohl, S. (2014). *Analyse der Rechenverfahren für die Ökobilanzierung im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB): Gegenüberstellung von detailliertem und vereinfachtem Rechenverfahren*. Fraunhofer IRB Verlag. Abgerufen von [http://www.irb-net.de/daten/rswb/1407900\\_2201.pdf](http://www.irb-net.de/daten/rswb/1407900_2201.pdf).
- (Rothermund, 2015) Rothermund, Uwe. (Hrsg.). (2015). *Der FM-Kennzahlenvergleich – Nutzungs- und Lebenszykluskosten zu verschiedenen Gebäudetypen*. fm-Benchmarking Bericht – Vergleichen Sie Ihre Immobilien-Kennzahlen. 2015, S. 28 – 46.
- (SIA, 2010) Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (SIA) (Hrsg.). (2010). *SIA Merkblatt 2032, Ausgabe 2010: Graue Energie von Gebäuden*. Zürich: Verlag SIA.
- (SimaPro, o.J.) Sima Pro Help Center: What does the acronym ReCiPe mean? Abgerufen von; <https://support.simapro.com/articles/FAQ/What-does-the-acronym-ReCiPe-mean> zuletzt überprüft am 31.07.2018
- (Stoiber, 2018) Stoiber, T. (2018). *LCA der technischen Gebäudeausrüstung von Büro- und Verwaltungsgebäuden anhand eines Fallbeispiels* (unveröffentlichte Masterarbeit). Technische Universität München, Deutschland.
- (Ströbele, 2013) Ströbele, B. (2013): Grenzen des Carbon Footprint für die Bewertung des ökologischen Bauens; in *Bauphysik*, 35 (2013), Heft 5, S. 338 bis 345
- (Struck, o.J.) Struck, C. (Hrsg.). (o.J.). *Toleranzen von Kostenermittlungen*. Abgerufen am 25.09.2018 von <http://www.ingbuero-struck.de/architektenleistungen/toleranzen-von-kostenermittlungen/>

- (UBA, 2012) Umweltbundesamt (Hrsg.). (2012). *Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten: Ökonomische Bewertung von Umweltkosten*. Dessau-Roßlau. Abgerufen von [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba\\_methodenkonvention\\_2.0\\_-\\_2012\\_gesamt.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_methodenkonvention_2.0_-_2012_gesamt.pdf)
- (VDI, 2012) Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2012). *VDI-Richtlinie 4600, Januar 2012: Kumulierter Energieaufwand (KEA). Begriffe, Berechnungsmethoden*. Berlin, Beuth Verlag.
- (Vogländer, 2001) Vogländer, J. (2001). *The model of the eco-cost/value ratio* (Dissertation). Technische Universität Delft. Abgerufen von: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a97d2ec9-4bf8-44f4-98b2-f4d83a7b5399/?collection=research>
- (Vogländer, 2018) How to estimate the eco-costs of a product with an EPD; Abgerufen von: <http://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/8-EPDestimates.html>; zuletzt überprüft am 31.07.2018
- (Wackernagel, & Rees, 1997) Wackernagel, M., Rees, W. (1997). *Unser ökologischer Fußabdruck: Wie der Mensch Einfluß auf die Umwelt nimmt*. Basel, Birkhäuser Verlag
- (Weißberger, 2016) Weißberger, M. (2016). *Lebenszyklusorientierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik* (Dissertation). Technische Universität München, Deutschland. Abrufbar unter <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20161213-1325463-1-9>
- (Weka Media, o.J.) Weka Media (Hrsg.). (o.J.). *Homepage: Sirados Bau-daten*. Abgerufen am 16.06.2017 von [www.sirados.de](http://www.sirados.de)

## Verwendete Normen

- DIN 276-1:2008-12 Kosten im Bauwesen –Teil 1: Hochbau
- DIN EN ISO 14040:2009-11 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006);
- DIN EN 15804:2014-07 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013
- DIN EN 15978:2012-10 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011

DIN V 18599:2011-12

Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung



## Anhang

### A1 – Gebäudesteckbriefe

## A1.1 Projekt A

Referenz- projekt	Projekt A		Projektlaufzeit		2014 - 2016		
			Energieeffizienz- standard		EnEV 2014		
Kurzbeschreibung des Projektes	Projekt A ist ein zweigeschossiges Büro- und Laborgebäude. Neben den Büroräumen befinden sich im Gebäude auch Besprechungsräume sowie eine Kantine mit 132 Plätzen und eine Küche.						
Gebäudeeigenschaften	Nutzungs- verteilung	1,2% Empfang/Foyer, 3,8% Konferenz, 5,1% Besprechung, 2,8% Einzelbüro, 2,4% Gruppenbüro, 6,8% Sanitär, 14,6% Verkehrsflächen, 9,7% Technik, 2,5% Server, 7,9% Lager, 16,6% Cafeteria, 2,4% Küche, 24,2% Großraumbüro			Ge- schosse:	II	
	A/V	0,41	BRI [m³]	13500	BGF/NGF [m²]	2663 / 2512	
	<b>Bauweise</b>						
	<b>Tragwerk</b>			<b>Fassade</b>			
	Stahlbetonbauweise			Fassadentyp: hinterlüftete Bandfassade Fensterflächenanteil: 45 %			
Energiebedarf	<b>Endenergiebedarf nach EnEV</b>						
	Heizung [kWh/m²a]		38,9		Kühlen [kWh/m²a]		1,5
	Lüftung [kWh/m²a]		23,8		Beleuchtung [kWh/m²a]		13,2
	Warmwasser [kWh/m²a]		12,2				
	Endenergie bezogen auf Energieträger		9,5 % Strom (Hilfsenergie), 87,1 % KWK regenerativ, 0,7 % Strom-Mix, 2,6 % KWK fossil				
	<b>Primärenergiebedarf nach EnEV</b>						
	Primärenergie [kWh/(m²a)]		162,4				
Kennwerte der Konstruktion	<b>KG 320 - Gründung</b>						
	<b>Gründung</b>			<b>Bodenplatte</b>			
	Art	Einzel- und Streifenfundamente		Art	Nichttragende Bodenplatte		
	Volumen [m³]		320		Fläche [m²]		1360
	<b>KG 330 - Außenwände</b>						
	<b>Außenwände</b>			<b>Außentüren und -fenster</b>			
	Art	WDVS und hinterlüftete Fassade		Art	Fensterband mit Aluminiumprofil		
	Fläche [m²]		1080		Fläche [m²]		880
	<b>Außenstützen</b>			<b>Sonnenschutz</b>			
	Art	Stahlbeton		Art	Blendschutz (innen) / Jalousien (außen)		
	Volumen [m³]		10		Fläche [m²]		280 / 310
	<b>KG 340 - Innenwände</b>						
<b>Innenwände, tragend</b>			<b>Innenstützen</b>				
Art	Stahlbeton / Mauerwerk		Art	Stahlbeton			
Fläche [m²]		770 / 470		Volumen [m³]		10	

<b>Kennwerte der Konstruktion</b>	<b>Innenwände, nichttragend</b>		<b>Innentüren und -fenster</b>	
	Art	Trockenbau	Art	Aluminium-/Holz- und Stahltüren
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	1200	Fläche [m <sup>2</sup> ]	210
	<b>KG 350 - Decken</b>			
	<b>Geschossdecken</b>			
	Art	Stahlbeton		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	1300		
	<b>KG 360 - Dächer</b>			
	<b>Dächer</b>			
	Art	Flachdach, z.T. Terrasse		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	1390		
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	580	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1,2
	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	6300	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	6920
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	2033			
<b>Kennwerte der TGA</b>	<b>KG 410 - Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen</b>			
	<b>Trinkwarmwassererzeuger</b>		<b>Trinkwarmwasserspeicher</b>	
	Art	WP (Wasser-Wasser), BHKW	Art	indirekt beheizter Warmwasserspeicher
	Leistung [kW]	n.b.	Leistung [kW]	n.b.
	<b>KG 420 - Wärmeversorgungsanlagen</b>			
	<b>Wärmeerzeugungsanlage</b>		<b>Raumheizflächen</b>	
	Art	WP (Wasser-Wasser), BHKW	Art der Übergabe	freie Heizflächen (Heizkörper)
	Leistung [kW]	269		
	<b>KG 430 - Lufttechnische Anlagen</b>			
	<b>Lüftungsanlage</b>		<b>Klima-/Kälteanlage</b>	
	Art	RLT-Anlage (mit WRG, Heizung, Kühlung, Befeuchtung)	Art	Kaltwassersystem: geothermische Kühlung + Wasserspeicher
	Leistung [kW]	n.b.	Leistung [kW]	n.b.
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	130	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	0,3
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1430	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1576	
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	246	Hinweis: Bei den Kosten der TGA handelt es sich nur um die Kosten der Energieerzeuger		
<b>Quellen</b>	Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599, Planungsunterlagen (Ausführungspläne, Leistungsverzeichnisse,...)			

## A1.2 Projekt B

Referenz-projekt	Projekt B		Projektlaufzeit		2014-2017		
			Energieeffizienz- standard		EnEV 2014		
Kurzbeschreibung des Projektes	Projekt B ist ein Bürogebäude, in dem sich neben Büros auch eine Mitarbeiterkantine, Demonstrationsräume, Werkstätten sowie ein Ausstellungsraum befinden. Da diese Nutzungen aber unmittelbar den Büros zugeordnet sind, wurde das komplette Gebäude als Büro betrachtet.						
Gebäude-eigenschaften	Nutzungs- vertei- lung	6% Einzelbüro, 10,9% Besprechung/Sitzung/Seminar, 17,1% Großraumbüro, 16,5% sonst. Aufenthaltsräume, 3,5% Kantine, 4,8% WC/Sanitär, 26,2% Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume, 15,1% Gewerbliche und industrielle Halle			Ge- schosse:	II	
		A/V	0,37	BRI [m³]			
	<b>Bauweise</b>						
	<b>Tragwerk</b>			<b>Fassade</b>			
	Stahlbetonbauweise			Fassadentyp: hinterlüftete Fassade, Lochfassade und Pfosten-Riegel- Fassade Fensterflächenanteil: 27 %			
Energiebedarf	<b>Endenergiebedarf nach EnEV</b>						
	Heizung [kWh/m²a]		84,4		Kühlen [kWh/m²a]		13,0
	Lüftung [kWh/m²a]		26,9		Beleuchtung [kWh/m²a]		13,9
	Warmwasser [kWh/m²a]		8,0				
	Endenergie bezogen auf Energieträger		62,7 % Erdgas; 37,3 % Strom-Mix				
	<b>Primärenergiebedarf nach EnEV</b>						
	Primärenergie [kWh/(m²a)]		140,0				
Kennwerte der Konstruktion	<b>KG 320 - Gründung</b>						
	<b>Gründung</b>			<b>Bodenplatte</b>			
	Art	Fundamentplatte		Art	Tragende Bodenplatte		
	Volumen [m³]	-		Fläche [m²]	1930		
	<b>KG 330 - Außenwände</b>						
	<b>Außenwände</b>			<b>Außentüren und -fenster</b>			
	Art	Hinterlüftete Fassade / Blechelemente		Art	Pfosten-Riegel- Konstruktion		
	Fläche [m²]	1710 / 230		Fläche [m²]	730		
	<b>Außenstützen</b>			<b>Sonnenschutz</b>			
	Art			Art	Blendschutz (innen) Trapezblech gelocht (außen)		
	Volumen [m³]	-		Fläche [m²]	250		
	<b>KG 340 - Innenwände</b>						
	<b>Innenwände, tragend</b>			<b>Innenstützen</b>			
	Art	Stahlbeton		Art	Stahlbeton		
Fläche [m²]	300		Volumen [m³]	20			

<b>Kennwerte der Konstruktion</b>	<b>Innenwände, nichttragend</b>		<b>Innentüren und -fenster</b>	
	Art	Trockenbau / Glasbausteine	Art	Holz- und Glas-Aluminiumtüren
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	1800 / 90	Fläche [m <sup>2</sup> ]	190
	<b>KG 350 - Decken</b>			
	<b>Geschossdecken</b>			
	Art			
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	1170		
	<b>KG 360 - Dächer</b>			
	<b>Dächer</b>			
	Art	Stahlbeton / Trapezblech		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	2150 / 170		
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	535	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1,3
	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	6450	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	7225
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1970			
<b>Kennwerte der TGA</b>	<b>KG 410 - Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen</b>			
	<b>Trinkwarmwassererzeuger</b>		<b>Trinkwarmwasserspeicher</b>	
	Art	Gas-Brennwertkessel (näherungsweise)	Art	Trinkwarmwasser-Verteilung: zentral / mit Zirkulation
	Leistung [kW]	286	Leistung [kW]	
	<b>KG 420 - Wärmeversorgungsanlagen</b>			
	<b>Wärmeerzeugungsanlage</b>		<b>Raumheizflächen</b>	
	Art	Gas-Brennwertkessel (näherungsweise)	Art der Übergabe	Radiatoren, Einzelraumheizer
	Leistung [kW]	107		
	<b>KG 430 - Lufttechnische Anlagen</b>			
	<b>Lüftungsanlage</b>		<b>Klima-/Kälteanlage</b>	
	Art	RLT (mit WRG, Heizung, Kühlung)	Art	Kompressions-kältemaschine (näherungsweise)
	Leistung [kW]	n.b.	Leistung [kW]	208
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	110	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	0,3
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1315	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	158	
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	26	Hinweis: Bei den Kosten der TGA handelt es sich nur um die Kosten der Energieerzeuger		
<b>Quellen</b>	Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599, Planungsunterlagen (Ausführungspläne, Leistungsverzeichnisse,...)			

## A1.3 Projekt C

Referenz- projekt	Projekt C		Projektlaufzeit		2009 - 2013		
			Energieeffizienz- standard		EnEV 2009		
Kurzbeschreibung des Projektes							
Das Projekt C ist ein fünfgeschossiger Neubau mit einem größeren Umkleidetrakt. Des Weiteren verfügt das Gebäude über einen Fitnessbereich, eine Kita und eine Mensa, die den Mitarbeitern zur Verfügung gestellt werden.							
Gebäude-eigenschaften	Nutzungs- vertei- lung	22,0% Büro, Gruppenbüro; 3,5% Kindertagesstätte; 0,7% Küche; 3,5% Lager, Technik; 37,4% Umkleiden-/ Sanitärbereiche; 10,0% Verkehrsflächen; 8,3% Technikzentrale, Lager; 3,1% Fitnessbereich; 11,5% Flur-Erschließungszone				Ge- schosse:	V
		A/V	0,27	BRI [m³]	68585		
	<b>Bauweise</b>						
	Tragwerk			Fassade			
	Stahlbetonbauweise			Fassadentyp: hinterlüftete Fassade (Lochfassade) Fensterflächenanteil: 41 %			
Energiebedarf	<b>Endenergiebedarf nach EnEV</b>						
	Heizung [kWh/m²a]		2,8		Kühlen [kWh/m²a]		19,5
	Lüftung [kWh/m²a]		28,3		Beleuchtung [kWh/m²a]		10,3
	Warmwasser [kWh/m²a]		27,4				
	Endenergie bezogen auf Energieträger		43,6 % Erdgas, 6,5 % solar, 49,9 % Strom-Mix				
	<b>Primärenergiebedarf nach EnEV</b>						
Primärenergie [kWh/(m²a)]		152,9					
Kennwerte der Konstruktion	<b>KG 320 - Gründung</b>						
	<b>Gründung</b>			<b>Bodenplatte</b>			
	Art	Einzel- und Streifenfundamente		Art	Tragende Bodenplatte		
	Volumen [m³]	2310		Fläche [m²]	4580		
	<b>KG 330 - Außenwände</b>						
	<b>Außenwände</b>			<b>Außentüren und -fenster</b>			
	Art	Betonsandwichfassade / hinterlüftete Fassade		Art	Einzelfenster mit Aluminiumrahmenprofil		
	Fläche [m²]	1150 / 2130		Fläche [m²]	2230		
	<b>Außenstützen</b>			<b>Sonnenschutz</b>			
	Art	Stahlbeton		Art	Sonnenschutzlamellen aus Aluminium		
	Volumen [m³]	1040		Fläche [m²]	1140		
	<b>KG 340 - Innenwände</b>						
<b>Innenwände, tragend</b>			<b>Innenstützen</b>				
Art	Kalksandstein/Stahlbeton		Art	Stahlbeton			
Fläche [m²]	3410/10100		Volumen [m³]	220			

<b>Kennwerte der Konstruktion</b>	<b>Innenwände, nichttragend</b>		<b>Innentüren und -fenster</b>	
	Art	Trockenbau	Art	Holz- und Stahltüren
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	4650	Fläche [m <sup>2</sup> ]	850
	<b>KG 350 - Decken</b>			
	<b>Geschossdecken</b>			
	Art	Stahlbeton (-Hohlkörper)		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	13610		
	<b>KG 360 - Dächer</b>			
	<b>Dächer</b>			
	Art	Stahlbeton (-Hohlkörper)		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	4540		
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	590	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1,4
	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	7150	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	8095
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	2133			
<b>Kennwerte der TGA</b>	<b>KG 410 - Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen</b>			
	<b>Trinkwarmwassererzeuger</b>		<b>Trinkwarmwasserspeicher</b>	
	Art	Erdsonden W-W-WP, BHKW (Erdgas), Solarkollektoren, Brennwertkessel (Erdgas)	Art	n.b.
	Leistung [kW]	n.b.	Leistung [kW]	n.b.
	<b>KG 420 - Wärmeversorgungsanlagen</b>			
	<b>Wärmeerzeugungsanlage</b>		<b>Raumheizflächen</b>	
	Art	Erdsonden W-W-WP, BHKW (Erdgas), Solarkollektoren, Brennwertkessel (Erdgas)	Art der Übergabe	n.b.
	Leistung [kW]	400 / 360	n.b.	
	<b>KG 430 - Lufttechnische Anlagen</b>			
	<b>Lüftungsanlage</b>		<b>Klima-/Kälteanlage</b>	
	Art	RLT mit WRG	Art	Absorptionskältemaschine
	Leistung [kW]	n.b.	Leistung [kW]	320
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	137	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	0,4
	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1685	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1908
	<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	216	Hinweis: Bei den Kosten der TGA handelt es sich nur um die Kosten der Energieerzeuger	
<b>Quellen</b>	Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599, Planungsunterlagen (Ausführungspläne, Leistungsverzeichnisse,...)			

## A1.4 Projekt D

Referenz- projekt	Projekt D	Projektlaufzeit		2012 - 2014		
		Energieeffizienz- standard		EnEV 2014		
Kurzbeschreibung des Projekt	Das Projekt D besitzt sechs Stockwerke sowie eine Tiefgarage. Das Gebäude weist eine durchgängige Büronutzung auf. Im Erdgeschoss befinden sich außerdem ein Tagungsraum sowie ein Mitarbeiterrestaurant.					
Gebäude-eigenschaften	Nutzungs- verteilung	18,2% Verkehr/Flur, 16,1% Lager/Technik/Verkehr, 3,3% Essen/Kantine, 1,8% Küche, 0,3% Fitnessraum, 9,6% Besprechung/Seminar/Tagung, 4,0% Bad/WC/Dusche, 7,6% Einzelraumbüro, 2,3% Gruppenbüro 2-6, 36,5% Großraumbüro, 0,4% Breakout			Ge- schosse:	TG + VI
	A/V	0,25	BRI [m³]	53653	BGF/NGF [m²]	14300 / 13685
	<b>Bauweise</b>					
	<b>Tragwerk</b>			<b>Fassade</b>		
Stahlbetonbauweise			Fassadentyp: Elementfassade, hinterlüftete Fassade Fensterflächenanteil: 35 %			
Energiebedarf	<b>Endenergiebedarf nach EnEV</b>					
	Heizung [kWh/m²a]	38,5		Kühlen [kWh/m²a]	1,9	
	Lüftung [kWh/m²a]	2,9		Beleuchtung [kWh/m²a]	21,1	
	Warmwasser [kWh/m²a]	4,2				
	Endenergie bezogen auf Energieträger	37,1 % Erdgas H, 62,9 % Strom-Mix				
	<b>Primärenergiebedarf nach EnEV</b>					
Primärenergie [kWh/(m²a)]	102,9					
Kennwerte der Konstruktion	<b>KG 320 - Gründung</b>					
	<b>Gründung</b>			<b>Bodenplatte</b>		
	Art	Fundamentplatte		Art	Tragende Bodenplatte	
	Volumen [m³]	-		Fläche [m²]	3010	
	<b>KG 330 - Außenwände</b>					
	<b>Außenwände</b>			<b>Außentüren und -fenster</b>		
	Art	Hinterlüftete Fassade (Stahlbeton / Kalksandstein)		Art	Fensterband mit Aluminiumprofil	
	Fläche [m²]	6170 / 380		Fläche [m²]	3470	
	<b>Außenstützen</b>			<b>Sonnenschutz</b>		
	Art	Stahlbeton		Art	Aluminiumlamellen	
	Volumen [m³]	330		Fläche [m²]	2320	
	<b>KG 340 - Innenwände</b>					
<b>Innenwände, tragend</b>			<b>Innenstützen</b>			
Art	Stahlbeton/Kalksandstein		Art	Stahlbeton		
Fläche [m²]	8230 / 1940		Volumen [m³]	220		

<b>Kennwerte der Konstruktion</b>	<b>Innenwände, nichttragend</b>		<b>Innentüren und -fenster</b>	
	Art	Trockenbau	Art	Holz- / Stahltüren
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	2500	Fläche [m <sup>2</sup> ]	1080
	<b>KG 350 - Decken</b>			
	<b>Geschossdecken</b>			
	Art	Stahlbeton		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	11270		
	<b>KG 360 - Dächer</b>			
	<b>Dächer</b>			
	Art	Stahlbeton		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	2960		
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	640	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1,8
	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	7650	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	9025
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	2243			
<b>Kennwerte der TGA</b>	<b>KG 410 - Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen</b>			
	<b>Trinkwarmwassererzeuger</b>		<b>Trinkwarmwasserspeicher</b>	
	Art	Sole-Wasser-Wärmepumpe, Brennwertkessel (Erdgas)	Art	Sole-Wasser-Wärmepumpe, Brennwertkessel (Erdgas)
	Leistung [kW]	n.b.	Leistung [kW]	n.b.
	<b>KG 420 - Wärmeversorgungsanlagen</b>			
	<b>Wärmeerzeugungsanlage</b>		<b>Raumheizflächen</b>	
	Art	Sole-Wasser-WP, Brennwertkessel (Erdgas)	Art der Übergabe	Flächenheizung
	Leistung [kW]	769		
	<b>KG 430 - Lufttechnische Anlagen</b>			
	<b>Lüftungsanlage</b>		<b>Klima-/Kälteanlage</b>	
	Art	RLT (mit WRG, Heizung, Kühlung, Befeuchtung)	Art	Kompressionskältemaschine
	Leistung [kW]		Leistung [kW]	
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	153	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	0,4
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1865	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	2180	
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	470	Hinweis: Bei den Kosten der TGA handelt es sich nur um die Kosten der Energieerzeuger		
<b>Quellen</b>	Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599, Planungsunterlagen (Ausführungspläne, Leistungsverzeichnisse,...)			

## A1.5 Projekt E

<b>Referenz-projekt</b>	<b>Projekt E</b>		<b>Projektlaufzeit</b>		2014 - 2016	
			<b>Energieeffizienz- standard</b>		EnEV 2014	
<b>Kurzbeschreibung des Projektes</b>	Das Projekt E ist ein fünfgeschossiges Bürogebäude. Im Erdgeschoss des Gebäudes wurde als zusätzliche Nutzung eine Mitarbeiterkantine eingerichtet. Des Weiteren befindet sich unter dem Gebäude eine Tiefgarage.					
<b>Gebäude-eigenschaften</b>	<b>Nutzungs- vertei- lung</b>	37,9% Verkehrsfläche; 26,2% Einzelbüro (ohne Lüftung); 17,1% Einzelbüro (mit Lüftung); 4,7% WC- und Sanitärräume; 4,5% Kantine; 3,1% Lager, Technik und Archiv; 2,6% Besprechung, Sitzung und Seminar; 2,3% Küche; 1,6% Nebenfläche			<b>Ge- schosse:</b>	TG + IV
	<b>A/V</b>	0,28	<b>BRI [m³]</b>	20037	<b>BGF/NGF [m²]</b>	5191 / 4504
	<b>Bauweise</b>					
	<b>Tragwerk</b>			<b>Fassade</b>		
	Stahlbetonbauweise			<b>Fassadentyp:</b> Hinterlüftete Fassade, Elementfassade <b>Fensterflächenanteil:</b> 29 %		
<b>Energiebedarf</b>	<b>Endenergiebedarf nach EnEV</b>					
	Heizung [kWh/m²a]		125,6	Kühlen [kWh/m²a]		1,1
	Lüftung [kWh/m²a]		2,2	Beleuchtung [kWh/m²a]		11,2
	Warmwasser [kWh/m²a]		3,9			
	Endenergie bezogen auf Energieträger		9,5 % Strom (Hilfsenergie); 89,7 % Kraft-Wärme-Kopplung (Fernwärme); 0,7 % Strom-Mix;			
	<b>Primärenergiebedarf nach EnEV</b>					
Primärenergie [kWh/(m²a)]		35,8				
<b>Kennwerte der Konstruktion</b>	<b>KG 320 - Gründung</b>					
	<b>Gründung</b>			<b>Bodenplatte</b>		
	Art	Fundamentplatte		Art	Tragende Bodenplatte	
	Volumen [m³]	-		Fläche [m²]	1290	
	<b>KG 330 - Außenwände</b>					
	<b>Außenwände</b>			<b>Außentüren und -fenster</b>		
	Art	Hinterlüftete Fassade/ Kellerwände gedämmt / Elementfassade		Art	Aluminium-Element- und Pfosten-Riegel-Fassade	
	Fläche [m²]	1130 / 450 / 530		Fläche [m²]	880	
	<b>Außenstützen</b>			<b>Sonnenschutz</b>		
	Art	Stahlbeton		Art	Blendschutz (innen), Aluminiumlamellen (außen)	
	Volumen [m³]	330		Fläche [m²]	830	
	<b>KG 340 - Innenwände</b>					
	<b>Innenwände, tragend</b>			<b>Innenstützen</b>		
Art	Stahlbeton		Art	Stahlbeton		
Fläche [m²]	1320		Volumen [m³]	90		

<b>Kennwerte der Konstruktion</b>	<b>Innenwände, nichttragend</b>		<b>Innentüren und -fenster</b>	
	Art	Trockenbau	Art	Aluminium-/ Holz- und Stahltüren
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	3050	Fläche [m <sup>2</sup> ]	650
	<b>KG 350 - Decken</b>			
	<b>Geschossdecken</b>			
	Art	Stahlbeton		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	3810		
	<b>KG 360 - Dächer</b>			
	<b>Dächer</b>			
	Art	Stahlbeton		
	Fläche [m <sup>2</sup> ]	1270		
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	575	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	1,6
	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	6650	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	7485
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	2443			
<b>Kennwerte der TGA</b>	<b>KG 410 - Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen</b>			
	<b>Trinkwarmwassererzeuger</b>		<b>Trinkwarmwasserspeicher</b>	
	Art	Nah-/Fernwärme: Kraft- Wärme-Kopplung, regenerativ	Art	indirekt beheizter Speicher
	Leistung [kW]	14		
	<b>KG 420 - Wärmeversorgungsanlagen</b>			
	<b>Wärmeerzeugungsanlage</b>		<b>Raumheizflächen</b>	
	Art	Nah-/Fernwärme: Kraft- Wärme-Kopplung, regenerativ	Art der Übergabe	Heizkörper (freie Heizflächen)
	Leistung [kW]	437		
	<b>KG 430 - Lufttechnische Anlagen</b>			
	<b>Lüftungsanlage</b>		<b>Klima-/Kälteanlage</b>	
	Art	RLT (mit WRG, Heizung, Kühlung)	Art	Kompressionskälte- anlage
	Leistung [kW]	n. b.	Leistung [kW]	351
	<b>Umweltwirkungen und Ressourcenabbaupotential - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>			
	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	170	AP [kg SO <sub>2</sub> -Äqu./m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	0,5
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	2040	Primärenergiebedarf gesamt [MJ/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	2304	
<b>Lebenszykluskosten - absolut - Lebenszyklus 50 a</b>				
[€/m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> ]	352	Hinweis: Bei den Kosten der TGA handelt es sich nur um die Kosten der Energieerzeuger		
<b>Quellen</b>	Energiebedarfsberechnung nach DIN V 18599, Planungsunterlagen (Ausführungspläne, Leistungsverzeichnisse,...)			

## A2 – Übersicht Regelaufbauten Projekte A,C und E

Kosten- gruppe	Kurzbezeichnung	Beschreibung
<b>KG 320</b>	A XPS_StB_EPS_ZE_Fliesen	Stahlbetonbodenplatte auf Sauberkeits- schicht und Perimeterdämmung XPS; Ze- ment-Schwimmestrich mit Trittschalldäm- mung EPS, Bodenbelag Fliesen
	A XPS_StB_EPS_ZE_Teppich	Stahlbetonbodenplatte auf Sauberkeits- schicht und Perimeterdämmung XPS; Ze- ment-Schwimmestrich mit Trittschalldäm- mung EPS, Bodenbelag Teppich
	C StB_TrennZE_Beschichtung	Stahlbeton-Bodenplatte mit Perimeterdäm- mung Glasschaumschotter, Abdichtung Bi- tumenbahn, Zementestrich auf Trennlage, Beschichtung Kunstharz
	E HoBo_ZE_Teppich	Stahlbetonbodenplatte auf Sauberkeits- schicht und Perimeterdämmung XPS; Hohl- boden und Zementestrich, Bodenbelag Tep- pich
<b>KG 330</b>	A StB_VHF_Blech	Stahlbeton-Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade, Bekleidung Stahl- blech, Dämmung Mineralfaser
	C StB_VHF_NSt	Stahlbeton-Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade, Bekleidung Natur- stein, Dämmung Mineralfaser
	C StB_VHF_BFt	Stahlbeton-Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade, Bekleidung Beton- Fertigteil, Dämmung Mineralfaser
	C StB_WDVS	Stahlbeton-Außenwand mit Wärmedämm- verbundsystem aus Mineralfaser
	E StB VHF BFt	Stahlbeton-Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade, Bekleidung Beton- Fertigteil, Dämmung Mineralfaser
<b>KG 334</b>	A Element-FeBand	Fensterband aus Fensterelementen, Profile Aluminium, 2-Scheiben-Isolierverglasung
	C FeElement	Fensterelement, Profile Aluminium, Drei- fachverglasung
	C Fe m. Lüftgskl.	wie vor, mit Lüftungsklappe aus Alu-Sand- wichpaneel

Kosten- gruppe	Kurzbezeichnung	Beschreibung
<b>KG 334</b>	E FeElement	Element aus Fensterelementen und Alu-Sandwichpaneelen, Profile Aluminium, 2-Scheiben-Isolierverglasung
<b>KG 340</b>	A GKB 125	Gipskarton-Leichtbauwand mit Metallblechprofilen und Mineralfaserdämmung
	A MW KaGiPutz	Innenwand aus Mauerwerk mit Kalkgipsputz
	C StB25_GiPutz	Stahlbeton-Innenwand mit Gipsputz
	C GKB 125	Gipskarton-Leichtbauwand mit Metallblechprofilen und Mineralfaserdämmung
	E StB25_Putz	Stahlbeton-Innenwand mit Dispersionssilikatputz
	E GKB 100	Gipskarton-Leichtbauwand mit Metallblechprofilen und Mineralfaserdämmung
<b>KG 350</b>	A StB_EPS_ZE_Fliesen	Stahlbetondecke, Zement-Schwimmestrich mit Trittschalldämmung EPS, Bodenbelag Fliesen
	A StB_EPS_ZE_Kautschuk	Stahlbetondecke, Zement-Schwimmestrich mit Trittschalldämmung EPS, Bodenbelag Kautschuk
	C StB_HoBo_CaSu_Tepp	Stahlbetondecke mit Hohlboden und Calciumsulfat-Fließestrich, Bodenbelag Teppich
	C StB_TrennZE_Beschichtg._AbhD	Stahlbetondecke mit Hohlboden, Zementestrich auf Trennlage, Bodenbeschichtung; Abhangdecke Gipskarton
	E StB_HoBo-CaSu_Tepp	Stahlbetondecke mit Hohlboden, Calciumsulfat-Fließestrich, Bodenbelag Teppich; Abhangdecke Gipskarton
<b>KG 360</b>	A StB_EPS_KSt_Kies	Stahlbetondecke, Dämmung EPS, Abdichtung Kunststoff, Kiesschüttung
	C StB_EPS_Bitu_XPS_Kies	Stahlbetondecke, Dämmung EPS, Abdichtung Bitumen, Dämmung XPS, Kiesschüttung
	E StB_EPS_Bitu_Grün	Stahlbetondecke, Dämmung EPS, Abdichtung Bitumen, extensive Dachbegrünung

## A3 – Bauteilaufbauten Projekt X

Xeco\_320

Bt-Fl.: 1845 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von oben nach unten</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Parkettlack transparent	325	0,3	0,31	10
Stabparkett	325	15	7,85	50
Dispersionsklebstoff UZIN UZ 57	325	0	0,50	10
Holzboden-Spachtelmasse	325	0	1,60	10
Estrichmörtel-Zementestrich	325	70	105,00	50
Dampfbremse (PE-Folie)	325	0,2	0,19	40
Mineralwolle (Boden-Dämmung)	325	30	2,55	50
Bitumenbahnen G 200 S4	325	3	3,14	30
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	324	300	705,60	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	324	300	47,10	50
Dampfbremse (PE-Folie)	326	0,2	0,19	40
Glasschaumschotter	326	140	23,10	50
Sauberkeitsschicht (Beton)	326	80	192,00	50
Dampfbremse (PE-Folie)	326	0,2	0,19	40

Xconv\_320

Bt-Fl.: 1845 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von oben nach unten</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Steinzeugfliesen, unglasiert	325	12	24,00	50
Fliesenkleber	325	3	4,35	40
Voranstrich (Kunstharz)	325	2	2,02	50
Estrichmörtel-Zementestrich	325	70	105,00	50
Dampfbremse (PE-Folie)	325	0,2	0,19	40
EPS-Hartschaum	325	20	0,37	40
EPS-Hartschaum	325	40	0,74	40
Bitumenbahnen G 200 S4	325	3	3,14	30
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	324	300	705,60	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	324	300	47,10	50
Dampfbremse (PE-Folie)	326	0,2	0,19	40
XPS-Dämmstoff	326	120	3,84	40
Sauberkeitsschicht (Beton)	326	80	192,00	50
Dampfbremse (PE-Folie)	326	0,2	0,19	40

Xeco\_330\_1

Bt-Fl.: 1115 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	336	0,2	0,31	15
Gipskartonplatte (Feuerschutz)	332	12,5	10,00	50
Oriented Strand Board (OSB)	332	25	15,00	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	332	160	10,10	50
Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich	332	160	13,11	50
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	332	40	6,40	40
Gipskartonplatte (Feuerschutz) imprägniert	332	12,5	10,00	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	335	30	1,23	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	335	30	1,33	50
Aluminium Blech (2005)	335	2,2	5,94	50
Eloxiertes Aluminiumblech	335	-	1,00	50

Xeco\_330\_2

Bt-Fl.: 575 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	336	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	336	12,5	10,50	50
Gipswandbauplatte	336	12,5	10,50	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	336	30	1,23	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	331	200	470,40	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	331	200	31,40	50
Oriented Strand Board (OSB)	335	25	15,00	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	335	160	10,10	50
Steinwolle-Dämmstoffe im mittleren Rohdichtebereich	335	160	13,11	50
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	335	40	6,40	40
Gipskartonplatte (Feuerschutz) imprägniert	335	12,5	10,00	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	335	30	1,23	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	335	30	1,33	50
Aluminium Blech (2005)	335	2,2	5,94	50
Eloxiertes Aluminiumblech	335	-	1,00	50

Xconv\_330

Bt-Fl.: 1690 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	336	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	336	12,5	10,50	50
Gipswandbauplatte	336	12,5	10,50	50
Stahl Feinblech (0,3-3,0mm)	336	-	2,64	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	331	200	470,40	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	331	200	31,40	50
Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)	335	200	9,16	50
Unterspannbahn PE gewebeverstärkt	335	0,4	0,10	30
Stahl Feinblech (0,3-3,0mm)	335	2	18,06	50
Aluminium Blech (2005)	335	2,2	5,94	50
Eloxiertes Aluminiumblech	335	-	1,00	50

Xeco\_334\_1

Bt-Fl.: 784 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Fugendichtungsbänder Butyl	334	-	2,26	30
Fugendichtungsbänder Butyl	334	-	2,22	30
Verglasung: Dreifachverglasung	334	-	3,99	30
Verglasung: Dreifachverglasung	334	-	1,96	30
Holz-Blendrahmen	334	-	2,33	50
Holz-Blendrahmen	334	-	2,24	50
Holz-Flügelrahmen	334	-	3,30	50
Aluminium Profil	334	-	1,53	50
Fensterbeschlag für Drehkipfenster	334	-	0,89	25
Fenstergriff	334	-	0,03	25

Xeco\_334\_2

Bt-Fl.: 784 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Fugendichtungsbänder Butyl	334	-	2,68	30
Holz-Blendrahmen	334	-	2,73	50
Aluminium Profil (2005)	334	-	0,80	50
Verglasung: Dreifachverglasung	334	-	7,68	30

Xconv\_334\_1

Bt-Fl.: 784 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Fugendichtungsbänder Butyl	334	-	2,26	30
Fugendichtungsbänder Butyl	334	-	2,22	30
Verglasung: Dreifachverglasung	334	-	3,99	30
Verglasung: Dreifachverglasung	334	-	1,96	30
Blendrahmen: Aluminium-Rahmenprofil	334	-	2,57	50
Blendrahmen: Aluminium-Rahmenprofil	334	-	2,47	50
Flügelrahmen: Aluminium-Rahmenprofil	334	-	2,33	50
Fensterbeschlag für Drehkipfenster	334	-	0,89	25
Fenstergriff	334	-	0,03	25

Xconv\_334\_2

Bt-Fl.: 2035 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Fugendichtungsbänder Butyl	334	-	2,68	30
Aluminium-Rahmenprofil, thermisch getrennt, pulverbeschichtet	334	-	3,00	50
Verglasung: Dreifachverglasung	334	-	7,68	30

Xeco\_340

Bt-Fl.: 3050 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	345	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)	342	40	0,91	50
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	342	60	3,84	50
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	345	0,2	0,31	15

Xconv\_340

Bt-Fl.: 3050 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	345	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)	342	60	1,58	50
Stahl Feinblech (0,3-3,0mm)	342	0,6	1,88	50
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Gipswandbauplatte	342	12,5	10,50	50
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	345	0,2	0,31	15

Xeco\_conv\_340\_1

Bt-Fl.: 2035 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	345	0,2	0,31	15
Gipsputz (Gips)	345	15	15,00	50
Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37	341	250	588,00	50
Bewehrungsstahl	341	250	39,25	50
Gipsputz (Gips)	345	15	15,00	50
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	345	0,2	0,31	15

Xeco\_conv\_340\_2

Bt-Fl.: 755 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37	341	1000	376,32	50
Bewehrungsstahl	341	1000	25,12	50
Gipsputz (Gips)	345	15	21,60	50
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	345	0,2	0,37	15

Xeco\_350\_1

Bt-Fl.: 3320 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	353	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	353	12,5	10,50	50
Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	351	75	38,03	50
Brettsperrholz (Durchschnitt DE)	351	60	29,36	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	351	150	352,80	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	351	150	23,55	50
Stahlprofil, 1,5 kg	352	0	1,50	50
Gipsfaserplatte	352	40	40,00	50
Holzspachtelmasse	352	0	1,60	10
Dispersionsklebstoff	352	0	0,50	10
Stabparkett	352	15	7,85	50
Parkettlack transparent	352	0,3	0,31	10

Xeco\_350\_2

Bt-Fl.: 1330 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	353	0,2	0,31	15
Gipsputz (Gips)	353	12	12,00	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	351	250	588,00	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	351	250	39,25	50
Stahlprofil, 1,5 kg	352	0	1,50	50
Gipsfaserplatte	352	40	40,00	50
Holzspachtelmasse	352	0	1,60	10
Dispersionsklebstoff	352	0	0,50	10
Stabparkett	352	15	7,85	50
Parkettlack transparent	352	0,3	0,31	10

Xeco\_350\_3

Bt-Fl.: 330 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	353	0,2	0,31	15
Gipsputz (Gips)	353	12	12,00	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	351	250	588,00	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	351	250	39,25	50
Lava Körnung	352	80	68,00	50
Mineralwolle (Boden-Dämmung)	352	30	2,55	50
Dampfbremse (PE-Folie)	352	0,2	0,19	40
Estrichmörtel-Zementestrich	352	70	105,00	50
Holzspachtelmasse	352	0	1,60	10
Dispersionsklebstoff	352	0	0,50	10
Stabparkett	352	15	7,85	50
Parkettlack transparent	352	0,3	0,31	10

Xeco\_350\_4

Bt-Fl.: 200 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	353	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	353	12,5	10,50	50
Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	351	75	38,03	50
Brettsperrholz (Durchschnitt DE)	351	60	29,36	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	351	150	352,80	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	351	150	23,55	50
Mineralwolle (Boden-Dämmung)	352	30	2,55	50
Dampfbremse (PE-Folie)	352	0,2	0,19	40
Estrichmörtel-Zementestrich	352	70	105,00	50
Voranstrich (Kunstharz)	352	0,2	0,20	50
Estrichmörtel und Estriche auf Basis von Epoxidharzen, gefüllt oder wässrig, gefüllt mit hohem Gehalt an Füllstoffen, 6,4 kg	352	-	3,00	15

Xconv\_350\_1

Bt-Fl.: 4650 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	353	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	353	12,5	10,50	50
Stahl Feinblech (0,3-3,0mm)	353	0,7	1,98	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	351	250	588,00	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	351	250	39,25	50
Dampfbremse PE	352	0,2	0,19	40
Stahlprofil, 1,5 kg	352	0	1,50	50
Gipsfaserplatte	352	15	15,00	50
Estrichmörtel-Calciumsulfatestrich	352	35	52,50	50
Holzspachtelmasse	352	0	1,60	10
Klebstoff	352	0	0,50	10
Teppich	352	5	2,50	15

Xconv\_350\_2

Bt-Fl.: 330 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	353	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	353	12,5	10,50	50
Stahl Feinblech (0,3-3,0mm)	353	0,7	1,98	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	351	250	588,00	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	351	250	39,25	50
Perlite 0-1	352	80	80,00	50
Mineralwolle (Boden-Dämmung)	352	30	2,55	50
Dampfbremse (PE-Folie)	352	0,2	0,19	40
Estrichmörtel-Zementestrich	352	70	105,00	50
Holzspachtelmasse	352	0	1,60	10
Dispersionsklebstoff	352	0	0,50	10
Klebstoff	352	0	0,50	10
Teppich	352	5	2,50	15

Xconv\_350\_3

Bt-Fl.: 200 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	353	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	353	12,5	10,50	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	351	250	588,00	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	351	250	39,25	50
Mineralwolle (Boden-Dämmung)	352	30	2,55	50
Dampfbremse (PE-Folie)	352	0,2	0,19	40
Estrichmörtel-Zementestrich	352	70	105,00	50
Voranstrich (Kunstharz)	352	0,2	0,20	50
Estrichmörtel und Estriche auf Basis von Epoxidharzen, gefüllt oder wässrig, gefüllt mit hohem Gehalt an Füllstoffen, 6,4 kg	352	-	3,00	15

Xeco\_360\_1

Bt-Fl.: 1645 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	364	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	364	12,5	10,50	50
Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	361	75	38,03	50
Brettsperrholz (Durchschnitt DE)	361	60	29,36	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	361	140	329,28	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	361	140	21,98	50
Bitumen Emulsion (40% Bitumen, 60% Wasser)	363	1	1,10	40
Bitumenbahnen V 60	363	3	5,23	30
Mineralwolle (Flachdach-Dämmung)	363	200	29,00	50
Bitumenbahnen V 60	363	3	3,14	30
Bitumenbahnen V 60	363	3	3,14	30
Lava Körnung	363	50	42,50	50
PE/PP-Vlies	363	0,2	0,08	30
Vegetationssubstrat, 128 kg	363	0	128,00	30

Xeco\_360\_2

Bt-Fl.: 150 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Fugendichtungsbänder Butyl	362	-	0,50	30
Holz-Blendrahmen	362	-	2,72	50
Aluminium Profil (2005)	362	-	2,76	50
Verglasung: Dreifachverglasung	362	-	7,68	30

Xconv\_360\_1

Bt-Fl.: 1645 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	364	0,2	0,31	15
Gipswandbauplatte	364	12,5	10,50	50
Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE)	361	75	38,03	50
Brettsperrholz (Durchschnitt DE)	361	60	29,36	50
Stahlbeton (Betonanteil 98 %)	361	140	329,28	50
Stahlbeton (Bewehrungsanteil 2 %)	361	140	21,98	50
Bitumen Emulsion (40% Bitumen, 60% Wasser)	363	1	1,10	40
Bitumenbahnen V 60	363	3	5,23	30
EPS-Hartschaum	363	200	3,70	40
Bitumenbahnen V 60	363	3	3,14	30
Bitumenbahnen V 60	363	3	3,14	30
PE-HD mit PP-Vlies zur Abdichtung	363	1	0,40	30
Kies 2/32	363	50	80,00	50

Xconv\_360\_1

Bt-Fl.: 150 m<sup>2</sup>

<b>Bauteilaufbau von innen nach außen</b>				
Bauteilschicht	KG	Schichtdicke [mm]	Masse [kg]	Nutzungsdauer [a]
Fugendichtungsbänder Butyl	362	-	2,68	30
Aluminium-Rahmenprofil, thermisch getrennt, pulverbeschichtet	362	-	3,00	50
Verglasung: Dreifachverglasung	362	-	7,68	30