

Diplomarbeit

# Ökobilanz, Flächenversiegelung und Flexibilität im Industriebau: Vergleich der vertikalen Bestandserweiterung gegenüber dem ebenen Neubau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads  
Diplom-Ingenieur  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

## Life cycle assessment, land sealing and flexibility in industrial construction: a comparison between vertical expansion and ground-level new construction

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

**Hendrik Villmann**

Matr.Nr.: 12228495

Betreuung: Assistant Prof.<sup>in</sup> Dipl.-Ing.<sup>in</sup> Dr.<sup>in</sup> techn. BSc **Julia Reisinger**  
Institut für Hochbau und Industriebau  
Forschungsbereich Integrale Planung und Industriebau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/A-1040 Wien, Österreich

Wien, im April 2025

---

## Kurzfassung

Die zunehmende Versiegelung von Böden durch den Bau- und Industriesektor stellt die österreichische Bauwirtschaft vor eine immer größer werdende Herausforderung. Angesichts der Klimaziele des Green Deals und der Notwendigkeit einer nachhaltigen Ressourcennutzung werden innovative Konzepte für den Umgang mit bestehenden und zukünftigen Bauflächen benötigt. Trotz der vorhandenen Potenziale bleiben derzeit viele der bestehenden Industriegebäude ungenutzt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts RE: STOCK INDUSTRY an der Technischen Universität Wien werden daher Konzepte entwickelt, um bestehende Tragstrukturen im Industriebau digital zu erfassen, zu modellieren und gezielt für vertikale Erweiterungen nutzbar zu machen. Das Ziel ist es, Ressourcen zu schonen und die Nachnutzung von Bestandsgebäuden zu fördern.

Die vorliegende Arbeit untersucht anhand eines bestehenden Industriegebäudes in Niederösterreich die ökologischen und funktionalen Vor- und Nachteile einer vertikalen Bestandserweiterung im Vergleich zum Abriss mit anschließendem Neubau. Dazu werden sowohl der Ressourcenverbrauch als auch die daraus resultierenden Umweltauswirkungen sowie die Flexibilität der Gebäudekonzepte analysiert. Im Fokus der Arbeit stehen die Potenziale der bestehenden Tragkonstruktion sowie die ökologischen Auswirkungen des Gebäudes, welche im Rahmen dieser Arbeit anhand des Treibhauspotenzials (GWP), des Versauerungspotenzials (AP) und des Gesamteinsatzes nicht erneuerbarer Primärenergien (PERNT) bewertet werden.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen dienen der nachhaltigen Gestaltung des Industrieausektors, indem sie die Zielsetzungen des Forschungsprojekts RE: STOCK INDUSTRY unterstützen und die Relevanz des Lebenszyklusansatzes im Bauwesen unterstreichen.

## Abstract

The increasing soil sealing caused by the construction and industrial sectors poses a growing challenge for the Austrian building industry. Considering the climate targets set by the European Green Deal and the urgent need for sustainable resource use, innovative concepts are required to manage existing and future building land efficiently. Despite their inherent potential, many existing industrial buildings currently remain unused.

As part of the RE: STOCK INDUSTRY research project at the Vienna University of Technology, strategies are being developed to digitally capture, model, and adapt existing industrial load-bearing structures for the purpose of targeted vertical extensions. The aim is to conserve resources and promote the reuse of existing buildings.

This thesis examines the ecological and functional advantages and disadvantages of vertical extensions compared to demolition and new construction, using an existing industrial building in Lower Austria as a case study. The analysis focuses on resource consumption, associated environmental impacts, and the functional flexibility of the respective building concepts. Particular emphasis is placed on the Potential of the existing structural framework and the building's ecological performance, which is assessed using indicators such as Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP) and the consumption of non-renewable primary energy (PERNT).

The findings of this study contribute to the sustainable transformation of the industrial construction sector by supporting the objectives of the RE: STOCK INDUSTRY project and highlighting the importance of a life cycle approach in contemporary construction practices.

## Erklärung zur Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war. Die eingereichte schriftliche Fassung ist identisch mit der elektronischen/digitalen Fassung.

Wien, 09.05.2025

---

Unterschrift des/der Studierenden

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines Studiums und insbesondere bei der Erstellung dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin, Frau Ass.-Prof.-Ing.in Dr.in techn. Julia Reisinger, die mich bei der Erstellung der Arbeit durch ihre fachliche Expertise und ihr konstruktives Feedback maßgeblich unterstützt hat.

Ebenso danke ich Dipl.-Ing. BSc. Nikolaus Kremslehner, der mich ebenfalls bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden und Freundinnen bedanken, die mich während meines gesamten Studiums immer unterstützt haben.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AWG</b>	Abfallwirtschaftsgesetz
<b>DGNB</b>	Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
<b>ASN</b>	Abfallschlüsselnummer
<b>AVV</b>	Abfallverzeichnis Verordnung
<b>GWP</b>	Globales Treibhauspotenzial, äquiv. zu Treibhausgasemissionen
<b>AP</b>	Versauerungspotenzial
<b>PERNT</b>	Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie
<b>PERT</b>	Primärenergiebedarf
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>BGF</b>	Bruttogeschossfläche
<b>BRI</b>	Brutto-Rauminhalt
<b>NGF</b>	Netto-Grundfläche
<b>NGFa</b>	überdeckt und allseitig in voller Höhe umschlossen (Innenräume)
<b>BIM</b>	Building Information Modelling
<b>VRIs</b>	Vertical Reuse Indicators
<b>naBe</b>	nachhaltige Beschaffung
<b>EPD</b>	Umwelt-Produktdeklaration

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract .....	II
Erklärung zur Abschlussarbeit.....	III
Danksagung .....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Methodik und Zielsetzung .....	3
2 Literaturrecherche / Stand der Technik.....	4
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen und Richtlinien.....	4
2.1.1 Europäische Verordnungen und Richtlinien.....	4
2.1.2 Kreislaufwirtschaft in Österreich .....	5
2.1.3 OIB-Richtlinie 7 zum nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen.....	7
2.1.4 Gebäudezertifizierungssysteme .....	8
2.2 Betrachtung des Lebenszyklus.....	11
2.2.1 Lebenszyklus des Gebäudes.....	11
2.2.2 Lebenszyklus der Bauprodukte und Materialien .....	13
2.3 End-of-Life-Phase in Österreich .....	15
2.3.1 Regelablauf des Rückbaus.....	15
2.3.2 Maschinelles Rückbau .....	18
2.4 Relevante Forschungsarbeiten.....	19
2.4.1 Ergebnisse der Literaturrecherche .....	21
3 Methodische Vorgehensweise .....	22
3.1 Vorgehensweise der Literaturrecherche.....	22
3.2 Vorgehensweise der Bestandsanalyse .....	23
3.3 Vorgehensweise der Fallstudie .....	24
3.3.2 Bewertungskriterien.....	26

4	Ergebnisse: Bestandsanalyse.....	29
4.1	Projektbeschreibung.....	29
4.2	Gebäudedaten.....	31
4.3	Lastannahmen Bestand .....	33
4.4	Tragwerk .....	34
4.5	Gebäudedaten.....	38
4.6	Umweltauswirkungen Bestand .....	40
5	Ergebnisse: Vergleichsstudie.....	43
5.1	Variante A: Vertikale Erweiterung.....	43
5.1.1	Tragsystem Variante A .....	43
5.1.2	Variante A: Gebäudedaten .....	45
5.1.3	Variante A: Umweltauswirkungen .....	48
5.2	Variante B: ebener Neubau .....	50
5.2.1	Variante B: Tragsystem .....	50
5.2.2	Variante B: Gebäudekennwerte.....	53
5.2.3	Variante B: Ergebnisse der Ökobilanzierung .....	56
5.3	Vergleich der Ergebnisse .....	58
5.3.1	Vergleich der Gebäudemassen .....	58
5.3.2	Vergleich der Ökobilanzierung.....	59
5.3.3	Vertical Reuse Indicators.....	61
5.3.4	Gesamtergebnisse .....	63
6	Schlussfolgerung/Ausblick .....	64
	Literaturverzeichnis .....	i
	Abbildungsverzeichnis.....	vii
	Tabellenverzeichnis.....	ix
	Anhang .....	x
	Anhang 1 Materialdaten .....	x
	Anhang 2 Bestandsgebäude.....	xi
	Anhang 2.1: Gebäudemassen Bestand.....	xi
	Anhang 2.2 Ökobilanz Bestand .....	xii
	Anhang 3 Vergleichsanalyse .....	xiii

Anhang 3.1	Gesamtmassen Variante A: Vertikale Erweiterung .....	xiii
Anhang 3.2	Ökobilanz Variante A: Vertikale Erweiterung .....	xiv
Anhang 3.3	Gesamtmassen Variante B: Ebener Neubau .....	xv
Anhang 3.4	Ökobilanz Variante B: ebener Neubau .....	xvi

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

In Österreich führt das steigende Industriewachstum der letzten Jahre zu einer zunehmenden Bautätigkeit und einer immer intensiveren Nutzung von Bodenflächen. Bis 2021 wurden etwa 5.800 Quadratkilometer Land beansprucht, was rund 7 % der Landesfläche und 18 % des Dauersiedlungsraums ausmacht [1]. Der Bausektor trägt zudem mit 60 % zur Rohstoffnutzung, 38 % zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen und 70 % zum globalen Abfallaufkommen bei [2, 3], was die Dringlichkeit nachhaltiger Lösungen zur Ressourcennutzung und Wiederverwendung der bestehenden Infrastruktur unterstreicht. Trotz der Verfügbarkeit von etwa 80.000 bestehenden Industrie- und Lagergebäuden sowie 20.000 Hektar ungenutzter Industrieflächen werden neue Produktionsstätten nur selten in bestehende Gebäude integriert [4, 5]. Um diesem anhaltenden Trend entgegenzuwirken, werden neue Planungskonzepte und Alternativen im Umgang mit Bestandsgebäuden benötigt. Im Rahmen des Forschungsprojektes RE: STOCK INDUSTRY [6] werden dazu digitale Methoden zur Erfassung, Modellierung und Analyse bestehender Tragstrukturen entwickelt, um das Potenzial bestehender Gebäude für die Wiederverwendung und Modernisierung bestimmen zu können.

Die Ertüchtigung bestehender Industriegebäude bietet Möglichkeiten, Ressourcen zu schonen und den Energieverbrauch im Bausektor zu reduzieren. Das Grundlegendokument zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7 beschäftigt sich hierzu mit der nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen und soll einen rechtlichen Rahmen für die 7. Grundanforderung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 [7] schaffen, die im Wesentlichen die Wiederverwendbarkeit von Baustoffen, die Langlebigkeit von Bauwerken und die Verwendung umweltverträglicher Materialien fordert [8]. Das Ziel ist es, in Bezug auf den europäischen Green Deal und die Kreislaufwirtschaftsstrategien der EU die Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz im Bauwesen verbindlich festzulegen.

Im Rahmen der Studie „Bau- und Abbruchabfälle in Niederösterreich“ des Umweltbundesamtes wurden für das Referenzjahr 2021 insgesamt 2,9 Millionen Tonnen mineralische Bau- und Abbruchabfälle in Niederösterreich ermittelt. Der Betonabbruch (949.000 Tonnen) sowie Bauschutt (1.110.000 Tonnen) machten dabei den größten Anteil aus [9]. **Tabelle 1** stellt die Bau- und Abbruchabfälle 2021 differenziert nach Abfallkategorien dar.

<b>Abfallkategorie</b>	<b>Aufkommen NÖ 2021 in t</b>
Bauschutt	1.110.000
Betonabbruch	949.000
Bitumen, Asphalt	508.000
Straßenaufbruch	97.000
Baustellenabfälle (kein Bauschutt)	99.000
Gleisschotter	77.000
Gips	56.000
Gefährliche mineralische Bau- und Abbruchabfälle	23.000
Sonstige nicht gefährliche mineralische Bau- und Abbruchabfälle	4.000
<b>Gesamt</b>	<b>2.923.000</b>

*Tabelle 1.1: Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen in Niederösterreich 2021 [9]*

Gerade in Bezug auf Industriegebäude können die massiven Tragstrukturen durch eine detaillierte Aufarbeitung und Bewertung bestehender Bauwerksstrukturen gut wiederverwendet oder ertüchtigt werden. Dies erfordert allerdings neue Ansätze und Herangehensweisen im Umgang mit bestehenden Tragwerken, um den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, wie sie in der EU-Kreislaufwirtschaftsstrategie und dem europäischen Green Deal formuliert sind, gerecht zu werden.

## 1.2 Methodik und Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes RE: STOCK INDUSTRY ist es, Industriegebäude für vertikale Erweiterungen nutzbar zu machen. Dadurch sollen Ressourcen geschont und nachhaltige Planungsstrategien gefördert werden. In diesem Zusammenhang untersucht die vorliegende Arbeit die Vor- und Nachteile einer vertikalen Bestandserweiterung gegenüber einem ebenen Neubau anhand eines konkreten Fallbeispiels. Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche werden zur Bewertung beider Konzepte die Gebäude hinsichtlich des Global Warming Potential (GWP) analysiert, welches die äquivalenten Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus eines Gebäudes beschreibt. Zudem werden die Indikatoren des Gesamteinsatzes nicht erneuerbarer Energien (PERNT) und des Versauerungspotenzials (AP) identifiziert, um die Umweltauswirkungen der entwickelten Gebäudekonzepte bewerten zu können.

Zunächst wird die Bestandsstruktur eines bestehenden Industriegebäudes untersucht, um das Potenzial für eine vertikale Aufstockung zu bewerten und die maßgebenden strukturellen Anforderungen zu identifizieren. Für die Bewertung des Gebäudes werden eindeutige Systemgrenzen festgelegt und basierend auf der durchgeführten Bestandsanalyse jeweils ein neues Produktionslayout für die vertikale Erweiterung sowie den ebenen Neubau des Gebäudes entwickelt. Die Lastanforderungen der jeweiligen Produktionsbereiche werden aus den Layouts ermittelt und maßgebende Tragwerksnachweise zur Umsetzung der Konzepte durchgeführt.

Um die Unterschiede zwischen der vertikalen Bestandserweiterung und dem ebenen Neubau zu veranschaulichen, werden beide Konzepte hinsichtlich der Ökobilanz, der Flächenversiegelung und der Flexibilität untersucht, um eine qualitative Bewertung beider Gebäude zu ermöglichen. Das Ziel ist es, die maßgebenden Vor- und Nachteile zwischen beiden Konzepten zu analysieren und nachhaltige Lösungsansätze für den Umgang mit bestehenden Industriegebäuden zu entwickeln.

## 2 Literaturrecherche / Stand der Technik

### 2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen und Richtlinien

Durch eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft sollen Materialflüsse optimiert werden, indem die Wiederverwendung gefördert, der Verbrauch minimiert und Rückgewinnungspotenziale entlang des Lebenszyklus besser genutzt werden [10, 11]. In diesem Zusammenhang werden im folgenden Kapitel die derzeit relevanten Richtlinien und Verordnungen zur Förderung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft im Bauwesen näher erläutert.

#### 2.1.1 Europäische Verordnungen und Richtlinien

Im Jahr 2015 wurde mit dem Übereinkommen von Paris die globalen Bestrebungen zum Schutz des Klimas verabschiedet. Das von insgesamt 195 Staaten unterzeichnete Dokument verfolgt das Ziel, die Erderwärmung auf unter 2 °C im Vergleich zu vorindustriellen Werten zu begrenzen [12]. In diesem Zusammenhang hat auch die Europäische Union 2018 einen Aktionsplan zur Finanzierung nachhaltigen Wachstums vorgelegt, um sowohl die im Übereinkommen von Paris vereinbarten Klimaziele als auch eine langfristige Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen [13]. Um die wirtschaftlichen Tätigkeiten konkret einordnen zu können, soll die EU-Taxonomie Verordnung [14] ein einheitliches Klassifizierungssystem schaffen, um nachhaltige Wirtschaftstätigkeiten zu definieren. Sie soll dazu beitragen, Finanzströme gezielt in Projekte und Unternehmen zu lenken, welche die EU-Klimaziele [10] fördern und somit ökologisch und ökonomisch nachhaltig sind. Insbesondere steht dabei die Minimierung klimabedingter finanzieller Risiken und die Schaffung langfristiger Transparenz in Finanzentscheidungen im Fokus.

Die Ziele der EU-Taxonomie umfassen im Wesentlichen 6 Ziele:

1. Klimaschutz
2. Klimawandelanpassung
3. Eine nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen
4. den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft
5. Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
6. Den Schutz und die Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme

Wirtschaftliche Tätigkeiten eines Unternehmens werden als nachhaltig eingestuft, wenn mindestens zu einem der genannten Zeile einen Beitrag geleistet wird, ohne einen negativen Einfluss auf eines der anderen Ziele zu haben. Eine einheitliche und klare Definition der Nachhaltigkeit ist essenziell, um zielgerichtete Investitionen im Sinne der Klimaneutralität bis 2050 anstreben zu können. Zusätzlich werden diese Ziele durch die Wachstumsstrategie der Europäischen Union sowie den im Jahr 2019 veröffentlichten Green Deal unterstützt. In diesem wurde das übergeordnete Ziel festgelegt, die Erderwärmung gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter auf höchstens 1,5 °C [15] zu begrenzen [14].

Der Bauwirtschaft kommt in dem Zusammenhang eine wesentliche Bedeutung zu, denn durch die Einführung ressourcenschonender Bauweisen und die Umsetzung einer konsequenten Kreislaufwirtschaft kann diese einen entscheidenden Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten.

### 2.1.2 Kreislaufwirtschaft in Österreich

Auch die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie verfolgt das Ziel, die bestehenden Wirtschaftsstrategien langfristig in eine neue Kreislaufwirtschaft zu überführen und damit bis 2040 Klimaneutral zu werden [16].

Um dies zu erreichen, sollen natürliche Ressourcen nach ihrer Entnahme möglichst lange im Wirtschaftskreislauf gehalten werden, um den Rohstoffverbrauch und die daraus resultierenden Abfallmengen zu reduzieren. Zur Reduzierung der Umweltbelastungen wurden in Österreich Grundsätze der Kreislaufwirtschaft (R-Grundsätze) [16] definiert, die sich in drei wesentliche Kategorien gliedern lassen:

- Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur
  1. Refuse: Produkte werden überflüssig, Nutzen wird anders erbracht
  2. Rethink: Umdenken und zirkuläres Design
  3. Reduce: Effizienzsteigerung oder geringerer Verbrauch
- Verlängerung der Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur
  4. Reuse: Wiederverwendung funktionsfähiger Produkte
  5. Repair: Reparatur und Wartung von Produkten
  6. Refurbish: Aufarbeitung alter Produkte
  7. Remanufacture: Wiederaufbereitung

- 8. Repurpose: anders weiternutzen
- Wiederverwerten von Materialien
- 9. Recycle: Wiederaufarbeitung von Materialien
- 10. Recover: Thermische Verwertung mit Energierückgewinnung

Um die Ziele der Kreislaufwirtschaftsstrategie [16] messbar zu machen, wurden diese quantifiziert und in die Bereiche Ressourcenverbrauch, Ressourcenproduktivität, Kreislauffähigkeit, und Materialverbrauch unterteilt. So soll der materielle Fußabdruck pro Kopf bis zum Jahr 2050 auf 7 Tonnen pro Jahr und der inländische Materialverbrauch bis 2030 auf 14 Tonnen pro Kopf gesenkt werden. Gleichzeitig soll die inländische Ressourcenproduktivität bis 2030 um 50 % im Vergleich zu 2015 erhöht werden und die Zirkularitätsrate auf 18 % erhöht werden. Auch bei Privatpersonen soll der Materialverbrauch, gemessen an den anfallenden Siedlungsabfällen, bis 2030 um 10 % reduziert werden.

Da der Bausektor einer der ressourcenintensivsten Bereiche ist, kommt diesem im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine zentrale Rolle zu. Ziel ist es, Gebäude neben der Errichtung über ihren gesamten Lebenszyklus zu betrachten und ressourcenschonende, kreislauforientierte Produktionsprozesse zu etablieren. Dadurch sollen der Materialeinsatz optimiert, die Abfallmengen reduziert und die Umweltbelastung minimiert werden. Um diese Ziele zu erreichen, müssen alle Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes von der Planung und Errichtung bis hin zum Rückbau und der Entsorgung strukturiert analysiert und gestaltet werden.

Besonders die Planungs- und Errichtungsphase spielt hierbei eine bedeutende Rolle, da in dieser Phase grundlegende Entscheidungen über die Konstruktion und den Materialeinsatz getroffen werden. Diese Entscheidungen haben direkten Einfluss auf die Lebensdauer eines Gebäudes sowie die Recycelbarkeit der Baustoffe. Es sollen langlebige, flexible und modulare Bauweisen entwickelt werden, die möglichst einfach an zukünftige Nutzungsanforderungen angepasst werden können. Darüber hinaus soll der verstärkte Einsatz nachhaltiger und recycelter Baustoffe gefördert werden, um Abhängigkeiten von Primärrohstoffen zu verringern und die Umweltauswirkungen zu minimieren.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist der verbesserte Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie die strukturierte Verwertung von Bodenaushub. Es sollen

rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, die Rückbaukonzepte und sortenreinen Abbruch sowie die Wiederverwendung von Materialien fördern. Finanzielle Anreize sollen dazu beitragen, dass Recyclingprodukte und Sekundärrohstoffe stärker im Bauwesen eingesetzt werden. Innovative Technologien und Geschäftsmodelle sollen die Ressourceneffizienz weiter steigern und neue Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft aufzeigen.

Ein weiterer zentraler Aspekt der Strategie ist die Förderung der nachhaltigen Beschaffung, insbesondere im öffentlichen Hoch- und Tiefbau. Dabei spielen die Vorgaben des nationalen Aktionsplans für nachhaltige Beschaffung (naBe) [17] eine wesentliche Rolle. Diese werden durch finanzielle Anreize ergänzt, die auf die Umsetzung ressourcenschonender Bauweisen und den verstärkten Einsatz nachwachsender Rohstoffe abzielen [16].

### 2.1.3 OIB-Richtlinie 7 zum nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen

Eine weitere Maßnahme zur Förderung der Kreislaufwirtschaft ist die noch nicht offiziell veröffentlichte OIB-Richtlinie 7 [7]. Mit dieser Richtlinie soll die siebte Grundanforderung der EU-Bauprodukteverordnung, die eine nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen fordert, in einen nationalen Standard für Österreich überführt werden.

Ziel der OIB-Richtlinie 7 ist es, verbindliche Standards für die Wiederverwendung und das Recycling von Baustoffen zu schaffen. Zudem sollen feste Kriterien für die Dokumentation und Dauerhaftigkeit von Bauwerken definiert werden, um die Nachhaltigkeit von Bauwerken in Österreich zu verbessern. Der Schwerpunkt liegt insbesondere auf der Planung von Rückbaukonzepten zur Abfallvermeidung und Förderung des Recyclings im Bauwesen. Durch die Förderung modularer Bauweisen sollen Materialien leichter trennbar und dadurch wiederverwendet werden können. Darüber hinaus spielt auch die Berechnung der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes eine zentrale Rolle. Dies erfordert eine umfassende Dokumentation der verwendeten Materialien, die als Grundlage für spätere Sanierungen und dem Rückbau der Gebäude dient.

Neben der Bauprodukteverordnung werden weitere Anforderungen aus dem europäischen Green Deal, der EU-Taxonomieverordnung, und dem Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft zur weiteren Präzisierung der nationalen Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Mit der Veröffentlichung der OIB-Richtlinie 7 sollen nicht nur Standards für die Kreislaufwirtschaft von Bauwerken definiert, sondern auch einheitliche Bewertungsgrundlagen eingeführt werden. Das Treibhauspotenzial (GWP) wird dabei als zentraler Indikator für die Nachhaltigkeitsleistung von Gebäuden herangezogen. Durch die Einführung konsequenter Maßnahmen zur Regulierung und Bewertung von Baumaßnahmen soll der Bausektor, als einer der größten Verursacher von Ressourcenverbrauch und Emissionen nachhaltig umgestaltet werden. Durch die Umsetzung der OIB-Richtlinie 7 sollen in Österreich innovative Ansätze im Umgang mit dem Lebenszyklus von Bauwerken gefördert werden. Die Trennung und Wiederverwendung von Materialien, aber auch die Verwendung nachhaltiger Baustoffe stehen dabei im Vordergrund, um die Kreislaufwirtschaft zu unterstützen und einen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2040 zu leisten [7].

#### 2.1.4 Gebäudezertifizierungssysteme

Zur qualitativen Bewertung der genannten nationalen und internationalen Ziele und Strategien sind kreislaufbezogene Kenngrößen erforderlich. Diese ermöglichen eine Einordnung der stofflichen Zusammensetzung, die Verbindungen eines Produktes und die daraus resultierenden Potenziale zur Wiederverwendung oder Verwertung von Produkten. Diese werden wiederum in Produkt- und Systemebene unterschieden, um sowohl die eingesetzten Materialien als auch die Zusammensetzung und die damit verbundene Trennbarkeit der Bauteile bewerten zu können [18].

Um Unternehmen bei der Herstellung von Produkten zu unterstützen, hat beispielsweise die Ellen MacArthur Foundation Berechnungstools wie den *Material Circularity Indicator* (MCI) [19] zur Bewertung ihrer hergestellten Produkte sowie die Analyseplattform *Circulytics* [20], zur Bewertung von Kreislaufprozessen entwickelt. Durch detaillierte Einblicke in die Materialflüsse und Ressourceneffizienz der Produkte können Fortschritte in der Produktion gemessen und verbessert werden.

Im Bauwesen wird die Nachhaltigkeit von Produkten und Gebäuden anhand verschiedener Systeme hinsichtlich der Umweltverträglichkeit, Ressourceneffizienz und Recyclingfähigkeit über den gesamten Lebenszyklus bewertet. Das Bewertungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) [21] soll die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen fördern. Es bewertet unter anderem die Auswahl umweltfreundlicher Materialien, die Rückbaubarkeit von Baustoffen sowie die Wiederverwendung von Ressourcen. Darüber hinaus bietet die DGNB ein Zertifizierungssystem an, das den Rückbau von Gebäuden im Sinne der Kreislaufwirtschaft regelt, um sicherstellen, dass Gebäude am Ende ihrer Lebensdauer möglichst ressourcenschonend und nachhaltig rückgebaut werden können.

Die Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) [22] ist ein international anerkanntes Zertifizierungssystem zur Bewertung der Umweltleistung von Gebäuden. Dabei werden die nachhaltige Beschaffung, das Abfallmanagement und die Minimierung der Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet. Die Aspekte Recycling und die Wiederverwendung von Materien stehen dabei im Vordergrund. BREEAM zertifizierte Gebäude sind daher möglichst energieeffizient und zeichnen sich durch eine geringe Umweltbelastung aus.

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) [23] ist ebenfalls ein weltweit anerkanntes Zertifizierungssystem für nachhaltiges Bauen. Dabei werden Gebäude hinsichtlich Energieeffizienz, der Wassernutzung und Materialauswahl bewertet. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft werden auch die Verwendung von Recyclingmaterialien und die Reduzierung von Bauabfällen berücksichtigt. LEED-zertifizierte Gebäude zeichnen sich vor allem durch ihre nachhaltige Bauweise und die Umsetzung nachhaltiger Baupraktiken aus.

In der Schweiz wird die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen durch das Minergie-ECO-Label [24] gefördert. Dabei sollen möglich gesundheits- und umweltverträgliche Produkte verwendet werden. Auch die Rückbaubarkeit von Gebäude spielt eine wichtige Rolle und soll Bauherr:innen bei der Umsetzung nachhaltiger Projekte unterstützen. Somit werden vor allem gesundheitlich unbedenkliche und umweltfreundliche Materialien gefördert.

Alle Zertifizierungssysteme überschneiden sich in einigen Punkten sowie in ihren Bewertungssystemen und setzen unterschiedliche Schwerpunkte im Sinne des Lebenszyklus eines Gebäudes. Vor diesem Hintergrund hat Anja Rosen in ihrer Dissertation „*Entwicklung einer Systematik zur qualitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung*“ [18] den Forschungsstand gängiger Zertifizierungssysteme hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit untersucht und den Urban Mining Indicator entwickelt, in dem die bestehenden Bewertungsmethoden neben bauphysikalischen und konstruktiven Aspekten um ökonomische Aspekte wie beispielsweise die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus ergänzt wurden.

Mit Hilfe von BIM-Modellen, Leistungsverzeichnissen oder auch Bauteilkatalogen, können Materialpässe bereits in der Planungs- und Bauphase erstellt werden. Hierzu bieten verschiedene Unternehmen Softwareunterstützungen zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Gebäuden an. Beispielsweise bietet das Programm Eco2Soft [25] eine bewehrte Lösung zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Gebäuden und kann auch zur Erstellung von Materialpässen verwendet werden. Die Ökobaudat [26] des deutschen Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) bietet zudem eine Online-Datenbank zur ökologischen Bewertung von Bauwerken und stellt standardisierte Ökobilanzdaten für unterschiedliche Bauprodukte und -prozesse zur Verfügung [18].

## 2.2 Betrachtung des Lebenszyklus

Aufbauend auf den erarbeiteten Richtlinien und Grundsätzen zur Notwendigkeit nachhaltiger Strategien im Bauwesen und der Bedeutung der Kreislaufwirtschaft werden im folgenden Kapitel die einzelnen Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes näher erläutert. Dabei werden die Potenziale von Kreislaufansätzen in der Planungs-, Bau-, Nutzungs- und End-of-Life-Phase detailliert beleuchtet.

### 2.2.1 Lebenszyklus des Gebäudes

Der Lebenszyklus eines Gebäudes beschreibt den Zusammenhang aller aufeinander folgenden Lebensphasen, die ein Gebäude von der Planung bis zum vollständigen Rückbau durchläuft. In der ÖNORM EN 15978 [27] wird die ökologische Qualität eines Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus hinweg anhand fest definierter Phasen analysiert. Angesichts der Lebensdauer eines Gebäudes von ca. 50–100 Jahren, ist es im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft notwendig, schon in der Planung nicht nur die Errichtung, sondern auch alle weiteren Lebenszyklusphase zu berücksichtigen, die sich wie folgt unterscheiden lassen.

Die erste Phase wird als Entwicklungsphase bezeichnet und umfasst im Wesentlichen die erste Idee bis hin zum Konzept des geplanten Projektes. In dieser Phase werden die grundlegenden Anforderungen an das Projekt definiert und der Marktbedarf sowie die technische Machbarkeit auf Basis der jeweiligen Rahmenbedingungen geprüft. Ziel dieser Phase ist es, eine Konzeptskizze des Projektes zu entwickeln und erste Kostenschätzungen vorzunehmen.

In der Planungsphase werden die detaillierten Baupläne entsprechend den definierten Nutzungsanforderungen festgelegt. Die Planungsphase kann in die Vorplanung, die Entwurfsplanung und die Ausführungsplanung unterteilt werden. Dazu gehört auch die Erstellung einer Lebenszyklusanalysen (LCA). Darüber hinaus werden die verwendeten Materialien sowie die Energieversorger festgelegt, um so von Beginn an einen nachhaltigen und ressourcenschonenden Umgang mit den eingesetzten Materialien über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes zu ermöglichen.

Die Errichtungsphase oder auch Bauphase umfasst die Realisierung des geplanten Gebäudes. Um die geplanten Anforderungen und einen nachhaltigen Umgang mit den

anfallenden Bauabfällen zu gewährleisten, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Planer:innen und den Bauunternehmen unerlässlich.

Mit der Fertigstellung des Gebäudes beginnt die Betriebsphase. Diese umfasst die Nutzung des Gebäudes sowie die Wartung und Instandhaltung, die für den Erhalt der Funktionsfähigkeit des Gebäudes notwendig sind. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollte der Schwerpunkt auf der Optimierung und der Ressourcennutzung sowie der Energieeffizienz des Gebäudes liegen. Ziel der Betriebsphase ist es, die Umweltauswirkungen des Gebäudes zu minimieren, die nachhaltige Nutzung der eingesetzten Ressourcen zu optimieren und die Effizienz des Gebäudes zu erhalten.

Instandsetzungen treten während der Nutzungsphase auf und können durch Modernisierungsmaßnahmen oder schadhafte Bauteile verursacht werden. Diese treten auf, wenn bestimmte Bestandteile des Gebäudes ihre Lebensdauer erreicht haben. Um dies festzustellen, werden während der Nutzungsdauer des Gebäudes Bestandsanalysen durchgeführt, um Schäden zu identifizieren und die Anforderungen an die jeweiligen Bauteile zu bewerten. Das Ziel ist es, durch Sanierungsmaßnahmen das Gebäude ökologisch und ökonomisch so zu optimieren, dass im Sinne der Kreislaufwirtschaft möglichst viele Materialien weiterverwendet und die Umweltbelastungen reduziert werden.

Mit dem Ende der Lebensdauer des Gebäudes beginnt die Rückbauphase. Diese umfasst den Rückbau mit der Materialtrennung, der Entsorgung und dem Recycling der Bausubstanz. Durch selektive Rückbaukonzepte können Materialien bereits beim Abbruch des Gebäudes voneinander getrennt werden, um die Wiederverwendung und fachgerechte Entsorgung zu verbessern. So können Materialien z.B. für weitere Recyclingschritte verwendet oder fachgerecht entsorgt werden.

Mit dem Urban Mining Index [18] können bereits in der Planungs- und Nutzungsphase des Gebäudes entscheidende Vorgaben für den Umgang und die Wiederverwendungsmöglichkeiten von Produkten gestellt werden. Materialien werden ökonomisch und ökologisch bewertet, um ihr Wiederverwendungspotenzial bereits in der Planungsphase zu ermitteln und so den Rückbau zu erleichtern und vor allem Baustoffe wie Beton, Holz, Stahl oder Glas so weit wie möglich wiederzuverwenden.

Die Komplexität bei der Lebenszyklusanalyse liegt vor allem in der Abhängigkeit aller Phasen über die Lebensdauer eines Gebäudes, weshalb eine konsequente Dokumentation und detaillierte Analyse unerlässlich ist [28].

**Abbildung 1** veranschaulicht die einzelnen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes.

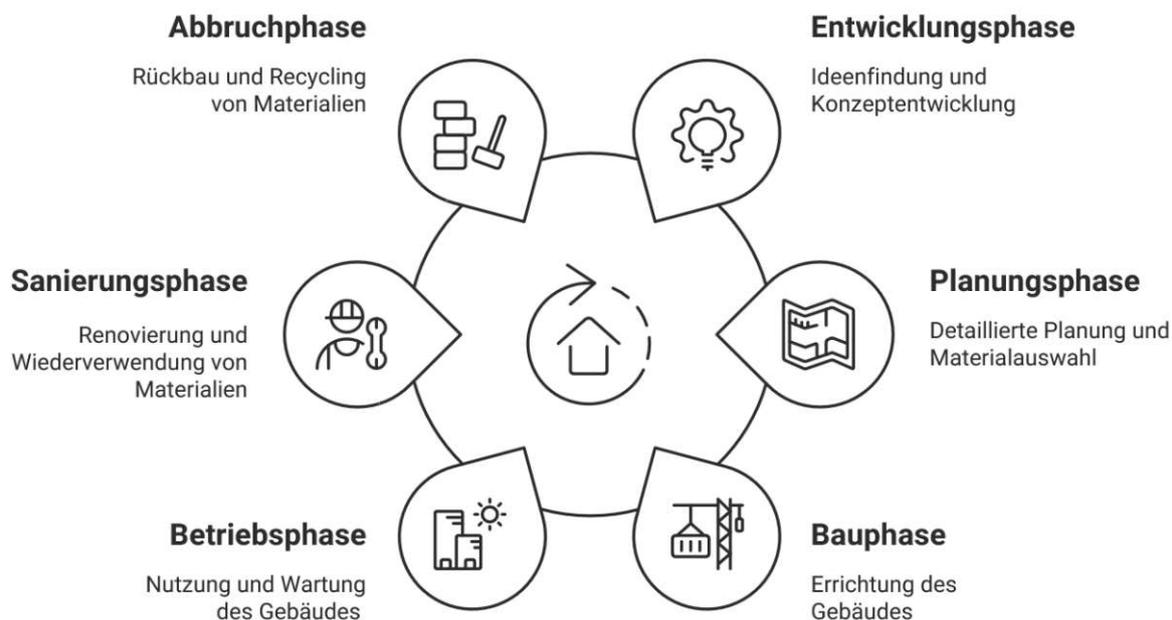


Abbildung 2.1: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes in Anlehnung an [27]

## 2.2.2 Lebenszyklus der Bauprodukte und Materialien

Die dargestellten Lebenszyklusphasen des Gebäudes sind von denen der Bauprodukte zu unterscheiden. Diese lassen sich gemäß der ÖNORM EN 15978 [27] und der Umwelt-Produktdeklaration (EPD) [29] in die Herstellungsphase (A1-3), Errichtungsphase (A4-5), die Nutzungsphase (B1-7), die Entsorgungsphase (C1-4) und die Verwertungsphase (D) unterteilen.

Die Herstellungsphase umfasst die Rohstoffgewinnung und die Verarbeitung der Produkte bestehend aus der Materialaufbereitung, der Formgebung und Endbearbeitung. Wesentliche Indikatoren in dieser Phase sind der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Herstellung. Häufig verwendete Baustoffe wie Beton, Stahl und Ziegel benötigen dabei große Mengen an CO<sub>2</sub>. Um diese zu minimieren, können der Einsatz von Recyclingmaterialien, energieeffiziente Produktionsprozesse und nachhaltige Konzepte zur Rohstoffgewinnung zur Reduzierung der Umweltbelastungen beitragen [30].

Die Errichtungsphase (A4-5) umfasst den Transport der Bauprodukte zur Baustelle und den Einbau. Das Ziel ist es hier, die Logistik und Verarbeitung der Materialien so effizient und ressourcenschonend wie möglich zu gestalten. Durch den mit dem Transport verbundenen Treibstoffverbrauch und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen trägt der Transportsektor wesentlich zur Umweltbelastung bei [31]. Neben der Verwendung regionaler Baustoffe und emissionsarmer Transportmittel können die Umweltauswirkungen auch durch die Bauzeit und ein nachhaltiges Abfallmanagement verringert werden. Klar strukturierte Bauabläufe und eine konsequente Abfalltrennung bei der Errichtung von Gebäuden sind daher unerlässlich.

In der Nutzungsphase (B1-7) werden die Bauprodukte innerhalb eines Gebäudes bewirtschaftet. Im Wesentlichen werden hier die Auswirkungen der Energieeffizienz, der Instandhaltung und der Instandsetzung betrachtet. Ziel ist es, die Produkte möglichst lange zu erhalten, ohne sie zu ersetzen und damit im Lebenszyklus zu halten [32]. Neben der Erhaltung tragen die Materialien auch zur Energieeffizienz des Gebäudes bei. Die verwendeten Dämmstoffe sowie Fenster und Türen in der Gebäudehülle tragen wesentlich zum Energieverbrauch des Gebäudes bei und können diesen bei entsprechender Materialauswahl positiv beeinflussen.

Am Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes beginnt die Entsorgungsphase (C1-4) der Produkte. Die Bau- und Abbruchbranche ist weltweit einer der größten Abfallproduzenten [33]. Produkte, die nicht verwertet werden können, werden in der Regel deponiert, verbrannt oder anderweitig entsorgt. Der Einsatz effizienter Verwertungstechniken und die sortenreine Trennung der Materialien auf der Baustelle sind daher von entscheidender Bedeutung, um Bauteile wiederverwenden zu können oder ordnungsgemäß zu entsorgen und damit die Umweltbelastung zu reduzieren. Die Verwertungsphase (D) umfasst in diesem Zusammenhang den Prozess der Rückführung der verwendeten Bauprodukte in den Produktionskreislauf. Dabei werden die verwendeten Materialien durch Recyclingprozesse und die generelle Wiederverwendung zurückgewonnen. Somit kann durch den verstärkten Einsatz von Sekundärrohstoffen der Bedarf an neuen Rohstoffen reduziert und Abfälle vermieden werden.

Da der Lebenszyklus von Gebäuden im direkten Zusammenhang mit denen der Bauprodukte steht, müssen beide Prozesse integrativ betrachtet werden. Die

Optimierung der Herstellungsprozesse und die nachhaltige Nutzung der eingesetzten Materialien sind entscheidend, um die Umweltbelastungen zu reduzieren und das Prinzip der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu integrieren [27].

**Abbildung 2** veranschaulicht die einzelnen Lebenszyklusphasen auf Gebäude- und Produktebene.

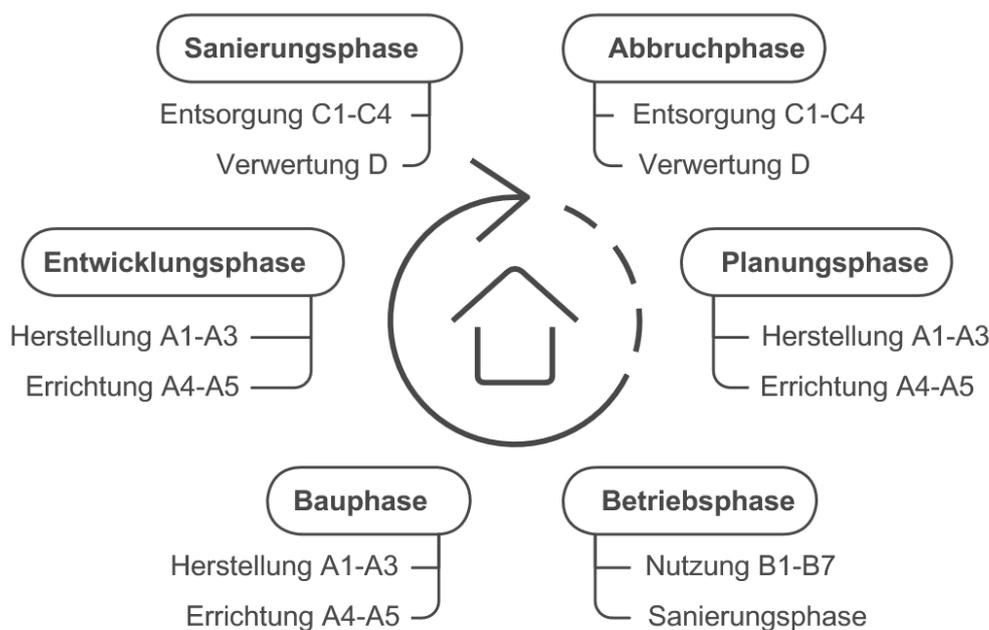


Abbildung 2.2: Lebenszyklus eines Gebäudes in Abhängigkeit der Lebenszyklen der Produkte in Anlehnung an [27]

## 2.3 End-of-Life-Phase in Österreich

Mit dem Ende der Lebensdauer eines Gebäudes beginnt auch dessen Rückbau. Um die im Zuge des Rückbaus auftretenden Probleme zu regeln und damit einen strukturierten Ablauf zu gewährleisten, sind die Rückbauprozesse in Österreich in der ÖNORM B3151:2022 [34] definiert. Dabei wird der Rückbau in mehrere Prozesse gegliedert, beginnend mit der Analyse der Hauptbestandteile des Gebäudes über die maschinelle Durchführung des Rückbaus bis hin zur nachhaltigen Entsorgung und Verwertung der verwendeten Materialien.

### 2.3.1 Regelablauf des Rückbaus

Da in Österreich ein Rückbau ohne wesentliche Begründung der Abbruchmaßnahmen nicht zulässig ist [35], muss dieser aus bestimmten Gründen erfolgen. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Bausubstanz. Sobald ein Gebäude seine Standsicherheit verloren hat oder andere Gefahren vom Gebäude ausgehen, ist ein

Rückbau unumgänglich. Das Merkblatt zur „*Beurteilung der technischen Unmöglichkeit von Instandsetzungen*“ [36] der MA37 Baupolizei der Stadt Wien regelt dabei die Abbruchreife eines Gebäudes und kann von einem qualifizierten Ingenieurbüro durchgeführt werden. Darüber hinaus ist der Abbruch eines Gebäudes auch dann zulässig, wenn die Sanierung des Gebäudes im Vergleich zur Neuerrichtung wirtschaftlich unzumutbar ist. Die Durchführung eines Neubaus ist insbesondere dann sinnvoll, wenn der vorhandene Raum durch einen Neubau effizienter genutzt werden kann. Neben der baulichen Notwendigkeit kann der Rückbau aber auch durch städtebauliche Entwicklungsmaßnahmen und den Ausbau der Infrastruktur erforderlich werden [37].

Je nach Bauwerk und Bauwerkszustand sind für den Rückbau eines Bauwerks unterschiedliche Untersuchungen durchzuführen und von entsprechenden Fachleuten zu beurteilen. In der ÖNORM B3151 werden diese Vorgehensweisen in Abhängigkeit von der Größe des Gebäudes und der anfallenden Abfallmengen gemäß **Abbildung 5** wie folgt dargestellt.

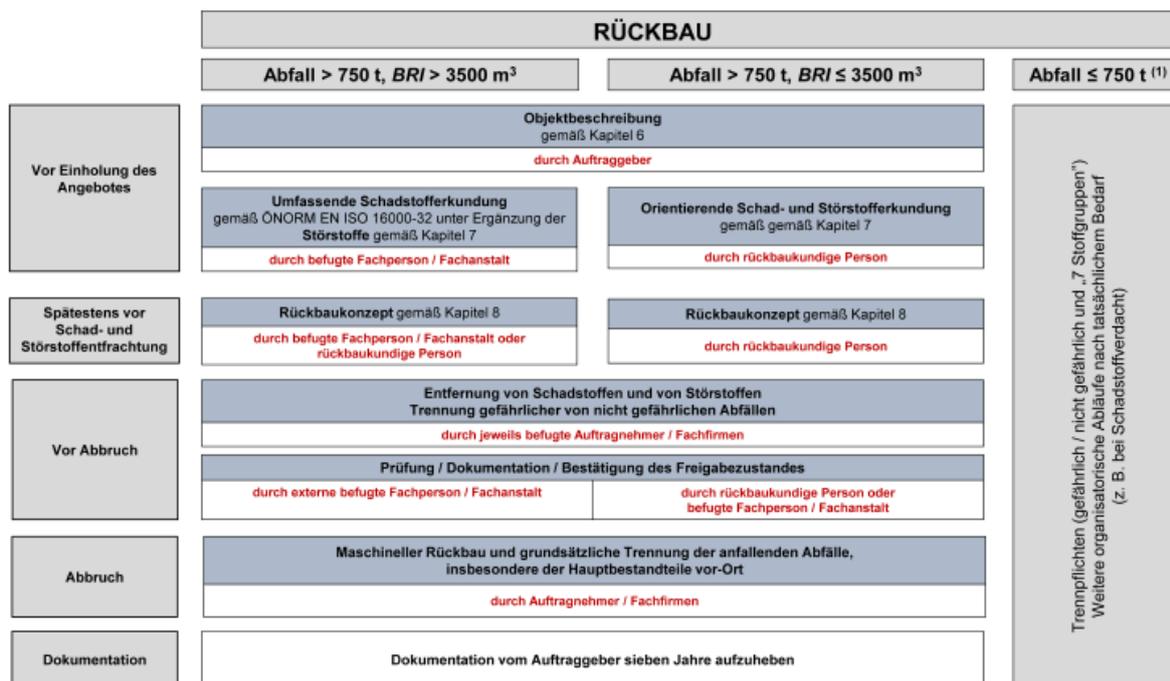


Abbildung 2.3: Ablauf des Rückbaus eines Gebäudes gemäß ÖNORM B3151 [34]

Vor dem Rückbau sind einige Schritte zu beachten. Zunächst müssen Voruntersuchungen durchgeführt werden, bei denen alle abbruchrelevanten Gebäudeteile identifiziert werden. Die Bauunterlagen werden gesichert und mögliche Gefährdungen für angrenzende Objekte analysiert. Dazu ist gemäß ÖNORM B

3151:2022 [34] eine detaillierte Objektbeschreibung zu erstellen, in der die verwendeten Baustoffe und abbruchrelevante Aspekte festgehalten werden.

Im Zuge einer Schadens- und Schadstofferkundung werden Gebäude auf potenzielle Gefahrenstoffe wie Asbest oder Schwermetalle untersucht, um eine fachgerechte Entsorgung sicherzustellen. Die Untersuchungen unterscheiden sich je nach Größe des Bauwerks und orientieren sich an den Vorgaben der ÖNORM EN ISO 16000-32 [38].

Auf Basis der im Vorfeld erhobenen Gebäudedaten wird das Rückbaukonzept erstellt. Dabei werden die Vorgehensweise, der Umgang mit den Baustoffen und die Verwertungskonzepte sowie die Recyclingstrategien festgelegt. Qualifizierte Fachkräfte sind für die Planung verantwortlich und steuern mit Rückbauplaner und Rückbauplanerinnen die Umsetzung und Koordination eines Projektes [34]. Die strukturierte Planung und Organisation des Rückbaus haben in erster Linie die Minimierung der Umweltauswirkungen und die Einhaltung der Umweltschutzvorschriften zum Ziel. Grundlage für einen nachhaltigen Rückbau ist die Untersuchung der bestehenden Gebäude in Bezug auf die verwendeten Materialien und möglicher Schadstoffe. Identifizierte Schadstoffe werden zunächst entfernt und entsprechend den geltender Umweltvorschriften entsorgt. In Österreich wird dies durch die Vorgaben der Recycling-Baustoffverordnung [39] geregelt, um die Entsorgung und den sicheren Umgang mit den entsprechenden Materialien zu gewährleisten.

Bei der Durchführung des Rückbaus ist die sorgfältige Planung der Baustelleninfrastruktur von wesentlicher Bedeutung. Dazu gehört die Festlegung von Büro-, Lager- und Entsorgungsflächen. Die sicherheitstechnischen und umweltrelevanten Vorgaben dienen dabei als Leitfaden und sind für einen sicheren und effizienten Ablauf entscheidend. Die ÖNORM B 3151 [34] legt die grundsätzlichen Anforderungen an die Materialtrennung sowohl für die Verwertung als auch für die Beseitigung fest.

Ziel ist es, sortenreine Abfallanteile zu erhalten, und diese möglichst von Schad- und Störstoffen zu befreien. Der geordnete und verwertungsorientierte Rückbau von Bauwerken, fördert zudem die Möglichkeit, die anfallenden Abfälle wiederzuverwenden und damit Umweltbelastungen zu reduzieren. Die Materialien werden hierzu in ihre Hauptbestandteile getrennt. Diese Trennung ermöglicht ein

hochwertiges Recycling und trägt somit zur Ressourcenschonung bei. Die Recycling-Baustoffverordnung [39] legt dazu die Anforderungen zum Abbruch von Bauwerken fest, um die Eignung der anfallenden Abfälle für die Herstellung von Recycling-Baustoffen zu verbessern.

### 2.3.2 Maschineller Rückbau

Der maschinelle Rückbau von Gebäuden stellt eine anspruchsvolle Aufgabe für die moderne Bauwirtschaft dar, die unter strenger Einhaltung von Sicherheitsstandards und möglichst nachhaltig durchgeführt werden muss. Die Planung des Rückbaus, der Einsatz geeigneter Techniken und die Beachtung relevanter Normen und Vorschriften sind dabei von entscheidender Bedeutung. Gemäß der Recycling-Baustoffverordnung ist eine detaillierte Schad- und Störstofferkundung unerlässlich. Der geordnete und verwertungsorientierte Rückbau von Bauwerken ist verpflichtend, um eine hohe Qualität der Recycling-Baustoffe zu gewährleisten. Die ÖNORM B 3151 [34] definiert dazu die erforderlichen Maßnahmen für den Rückbau von Bauwerken und legt die grundlegenden Anforderungen an die Trennung der einzelnen Materialien fest. Durch die strukturierte Verwertung und Beseitigung der Materialien sollen sortenreine Abfallfraktionen entstehen, die möglichst frei von Schad- und Störstoffen sind.

Die beim Rückbau gewonnenen Materialien werden sortenrein nach den Hauptbestandteilen getrennt und aufbereitet, um das Recyclingpotenzial zu erhöhen. Die Materialien werden entsprechend ihrer Recycling- und Verwertungsmöglichkeiten auf der Baustelle gelagert und die vorhandenen Mengen und Zusammensetzungen dokumentiert, um die Verwertung der Materialien nachvollziehen zu können.

Die Entsorgung von Bauabfällen wird in Österreich durch die Baustoff-Recyclingverordnung und die Abfallverzeichnisverordnung geregelt. Zur eindeutigen Identifizierung und Klassifizierung von Bau- und Abbruchabfällen werden verbindliche Abfallschlüsselnummern (ASN) verwendet. In Anlehnung an die europäische Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) [40], die eine einheitliche Nomenklatur innerhalb der EU vorschreibt, wird im Wesentlichen zwischen gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen unterschieden. Die konsequente Dokumentation und Trennung der Materialien stellt sicher, dass die Anforderungen der EU-Abfallrahmenrichtlinie und der österreichischen Abfallverordnung erfüllt werden, um zur Förderung der Kreislaufwirtschaft beizutragen [39].

## 2.4 Relevante Forschungsarbeiten

Aufgrund der dargestellten Relevanz der LCA für die Entwicklung nachhaltiger Gebäudekonzepte wurden bereits umfassende Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. Insbesondere stehen dabei die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes, von der Herstellung bis zum Rückbau „Cradle to Grave“, sowie die verwendeten Materialien im Fokus. Im Rahmen dieser Arbeit werden relevante Arbeiten zur Untersuchung bestehender Gebäude sowie möglicher Sanierungskonzepte und deren Umweltauswirkungen vorgestellt.

Michelle Leichter et. al. (2024) [41] untersuchten mithilfe einer dynamischen Lebenszyklusanalyse (LCA) verschiedene Sanierungsmaßnahmen und den Neubau eines bestehenden Einfamilienhauses, um die Umweltauswirkungen der Sanierung im Vergleich zum Neubau zu bewerten. Basierend auf den internationalen Normen der (ISO 14040, ISO14044) und Nachhaltigkeitsstandards (EN 15978 und EN 1580) wurden drei Szenarien untersucht. Zum einen die Standardrenovierung (RN), die optimale Renovierung (RO) sowie der Neubau des Gebäudes (RC) die wiederum hinsichtlich des aktuellen Strommix ohne erneuerbare Energien (REF) und dem Einsatz erneuerbarer Energien (CORE-95) unterschieden wurden. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass der Neubau (RC) über den gesamten Lebenszyklus bis zu 92 % der Umweltauswirkungen gegenüber den Renovierungsszenarien einsparen kann. Da die Emissionen im Gebäudebetrieb bei den durchgeführten Analysen ausschlaggebend sind, wird der Einfluss der verwendeten Energiequellen für die Umweltauswirkungen verdeutlicht. Trotz der höheren Emissionen in der Bauphase führt die verbesserte Energieeffizienz des Neubaus langfristig zu geringeren Emissionen gegenüber den Sanierungsmaßnahmen [41].

In Bezug auf den Umgang mit bestehenden Industriegebäuden untersuchten Cecilia Ciacci et. al. (2023) [42] die Sanierung der Gebäudehülle sowie den Einsatz erneuerbarer Energien mittels einer LCA. Anhand eines repräsentativen Industriegebäudes aus den 80er Jahren und eines Betrachtungszeitraums von 20 Jahren wurde analysiert, wie Sanierungsmaßnahmen die Umweltauswirkungen eines Gebäudes bereits über einen kurzen Zeitraum beeinflussen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Kombination einer Sanierung der Gebäudehülle und dem Einsatz erneuerbarer Energien die Emissionen um bis zu 60 % und der nicht erneuerbare

Primärenergiebedarf um bis zu 55 % gesenkt werden konnten. Die Untersuchungen verdeutlichen, dass die Herstellungsphase (A1-A3) die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht, welche wiederum in der Betriebsphase (B6) aufgrund der verbesserten Energieeffizienz des Gebäudes kompensiert werden [42].

Mon Abouhamad und Metwally (2021) [43] untersuchten zudem den Einfluss verschiedener Tragwerksysteme auf die Umweltbilanz eines Gebäudes und entwickelten ein LCA-Framework. In einer Fallstudie wurden der Stahlbetonbau (RCC), warmgewalzte Stahlbau (HRS) und Stahlleichtbau (LSC) hinsichtlich ihres GWP und Primärenergiebedarfs (PERT) verglichen. Basierend auf erstellten BIM-Modellen wurden die Bauteilmassen ermittelt und mithilfe der EPDs die Umweltauswirkungen bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellungsphase der Produkte mit etwa 90 % den größten Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Die Leichtbauvariante (LSC) stellte sich als die nachhaltigste Bauweise heraus, da sie gegenüber dem RCC sowie des HRS sowohl geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch einen niedrigeren Energieverbrauch aufweist. Die Auswertung anhand des LEED-Zertifizierungssystems ergab für das RCC-System 0 Punkte, das HRS-System 3 Punkte und für das LSC-System 5 Punkte. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung des Tragsystems zur Entwicklung nachhaltiger Gebäudekonzepte [43].

Neben klassischen Sanierungskonzepten rückt zudem die digitale Bewertung bestehender Gebäude in den Fokus, um nachhaltige Bauentscheidungen treffen zu können. Julia Reisinger et al. [44] untersuchen in diesem Zusammenhang anhand des RE: STOCK INDUSTRY Frameworks die Potenziale der vertikalen Aufstockung und deren Umsetzung im Industriebau. Hierzu wurde ein digitaler Workflow entwickelt, für den Photogrammetrie und Laserscanning zur Bestandsaufnahme genutzt werden. Ein KI-gestützter Algorithmus erstellt basierend darauf ein Finite-Elemente-Modell zur Tragwerkanalyse. Die Ergebnisse der Analysen werden über eine AR-App visualisiert, um Schwachstellen des Tragwerks zu identifizieren und Aufstockungsszenarien direkt vor Ort modellieren zu können. Die Anwendung des Frameworks soll eine ressourcenschonende Nutzung bestehender Industriegebäude fördern und potenziell bis zu 70 % des Abfallaufkommens sowie bis zu 50 % der ökologischen Auswirkungen reduzieren. Die Studie weist jedoch auch auf die Notwendigkeit weiterer Validierungen anhand realer Bauprojekte, insbesondere hinsichtlich der Präzision der KI-Modelle und der Integration in BIM-Prozessen hin, um das entwickelte Framework als

standardisierte Lösung ressourcenschonender Konzepte im Industriebau anwenden zu können [44].

### 2.4.1 Ergebnisse der Literaturrecherche

Die Literaturrecherche verdeutlicht, dass die Entscheidung zwischen einer vertikalen Bestandsertüchtigung und einem Neubau aus ökologischer Sicht stark von der Materialwahl, der Tragkonstruktion sowie den verwendeten Energiequellen abhängt. Während Neubauten oft aufgrund einer höheren Energieeffizienz geringere Emissionen über den Gebäudebetrieb aufweisen können, verursachen sie in der Bauphase erhebliche Umweltbelastungen, wobei vor allem die Herstellung der Materialien einen Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen ausmacht. Dies verdeutlicht die Relevanz der grauen Energie für die Betrachtung nachhaltiger Gebäudekonzepte, da diese die Primärenergie umfasst, die notwendig ist, um ein Gebäude zu errichten [45]. Digitale Methoden wie beispielsweise BIM-gestützte Ökobilanzierungen und KI-gestützte Tragwerksanalysen gewinnen zunehmend an Bedeutung hinsichtlich der nachhaltigen Planung und Bewertung von Gebäuden. Dadurch können die Umweltauswirkungen entwickelter Konzepte präzise quantifiziert werden und unterstützen so bei der Entscheidungsfindung ressourcenschonender Bauweisen. Trotz der Erkenntnisse der vorgestellten Forschungsarbeiten ergeben sich zentrale Fragestellungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden sollen.

- Welche ökologischen Vor- und Nachteile bietet die vertikale Aufstockung im Industriebau hinsichtlich der grauen Energie gegenüber einem ebenen Neubau bei identischer Bauweise.
- Welches Potenzial bieten bestehende Tragwerke im Industriebau zur Umsetzung vertikaler Aufstockungen und wie sind diese umsetzbar.
- Wie können Bestandsanalysen der Tragstruktur erweitert und verbessert werden

Neben den ökologischen Vorteilen erneuerbarer und effizienter Energiekonzepte soll diese Arbeit dazu beitragen, die Vor- und Nachteile im Umgang mit der bestehenden Gebäudestrukturen aufzuzeigen, um die wesentlichen Einflüsse der grauen Energie für ressourceneffiziente und emissionsarme Bauweisen im Industriebau zu verdeutlichen.

### 3 Methodische Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel wird die methodische Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit erläutert, die als Grundlage für die durchgeführten Untersuchungen dient. Die Forschungsmethodik gliedert sich in folgende Schritte:

- **Literaturrecherche** als theoretische und wissenschaftliche Grundlage der Untersuchungen
- **Bestandsanalyse** des ausgewählten Gebäudes
- **Entwicklung und Analyse** von zwei Nutzungskonzepten (Layouts)
- **Statische Nachweise** zur Beurteilung der baulichen Machbarkeit beider Konzepte
- **Ökobilanzierung der Konzepte**
- **Vergleichsanalyse**

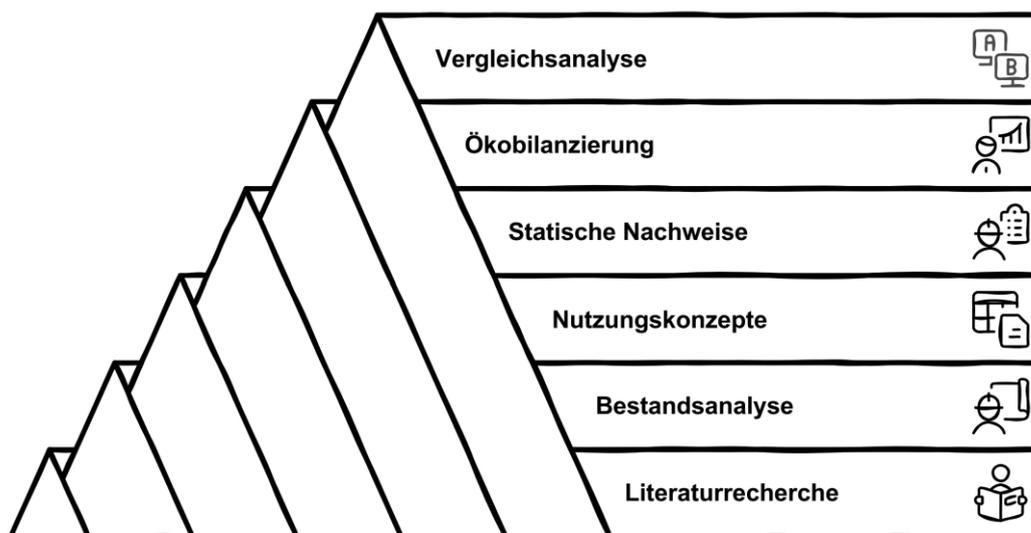


Abbildung 3.1: Darstellung der methodischen Vorgehensweise

#### 3.1 Vorgehensweise der Literaturrecherche

Die Literaturrecherche bildet die Grundlage für die Bewertung der Kreislaufwirtschaft von Gebäuden und umfasst sowohl wissenschaftliche Publikationen als auch internationale und nationale rechtliche Vorgaben. Zunächst wurden die europäischen Richtlinien und Verordnungen wie das Pariser Klimaabkommen, die EU-Taxonomie-Verordnung und der europäische Green Deal untersucht. Die nationalen Vorgaben in Österreich wurden anhand der OIB-Richtlinie 7 zur nachhaltigen Planung und

Ausführung von Bauvorhaben sowie des Abfallwirtschaftsgesetzes zur Entsorgung und Verwertung von Bauabfällen dargestellt. Für die Betrachtung des Lebenszyklus eines Gebäudes wurde der Stand der Technik von der Errichtung bis zum Rückbau eines Bauwerks auf Bauprodukt-, Material- und Gebäudeebene dargestellt. Darüber hinaus wurde die End-of-Life-Phase des Gebäudes in Hinblick auf den standardisierten Regelablauf des Rückbaus betrachtet und relevante wissenschaftliche Arbeiten im Kontext der vorliegenden Arbeit untersucht.

### 3.2 Vorgehensweise der Bestandsanalyse

Die Bestandsanalyse wurde anhand der für das Gebäude vorhandenen Planungsunterlagen durchgeführt, die aus Architekturplänen, der Baubeschreibung im Rahmen einer thermischen Sanierung sowie dem Energieausweis des Gebäudes und einer aktuellen Fotodokumentation bestand. Ziel der Analyse war die detaillierte Aufarbeitung der Bestandsstruktur und die vorhandenen Lastreserven der Tragstruktur zu erfassen.

Dazu wurde mit Hilfe von ArchiCAD 27 [46] ein digitales Gebäudemodell erstellt, in dem alle relevanten Informationen aus den Planungsunterlagen in Bezug auf die Bauteilaufbauten und der verwendeten Materialien integriert wurden. Das erstellte Gebäudemodell diente als Datengrundlage für weitere Analysen und ermöglichte eine detaillierte digitale Abbildung des Gebäudebestands. Um die ökologischen Eigenschaften der Baumaterialien zu bewerten, wurden basierend auf den Datenbanken der Ökobaudat [26] und Eco2Soft [25] die Kennwerte des GWP, PERNT sowie des AP der vorhandenen Materialien ermittelt und die Lebensdauer der Baumaterialien festgelegt. Die erhobenen Daten wurden anschließend in einer Excel-Tabelle konsolidiert, um eine umfassende Analyse der ökologischen Auswirkungen für die verwendeten Baustoffe zu ermöglichen. Die festgelegten ökologischen Kennwerte, sowie die Nutzungsdauer der jeweiligen Materialien können dem **Anhang 1.1** entnommen werden.

Die bestehende Tragstruktur des Gebäudes wurde auf Grundlage der vorhandenen Abmessungen mithilfe der Software mb-WorkSuite 2024 [47] analysiert, um die Lastreserven des bestehenden Tragwerks zu ermitteln und dessen Eignung für vertikale Erweiterungen zu bewerten. Die Planungsunterlagen lieferten dabei wesentliche Informationen zum Tragsystem sowie den Querschnittsabmessungen.

Basierend auf den erfassten Daten wurden die maßgebenden statischen Nachweise für das vorhandene Stahlbetontragwerk geführt, um die Bewehrungsgrade der Bauteile festzulegen. Gemäß dem EN 1992-1-1 [48] wurden diese so gewählt, dass die Mindestanforderungen der Tragfähigkeit erfüllt sind und somit eine sichere und fundierte Einschätzung der Tragwerkskapazitäten für vertikale Erweiterungen ermöglicht wird.

Durch die Kombination der digitalen Gebäudemodelle, der ökologischen Bewertung der Materialien und der statischen Analyse konnte eine umfassende Bestandsanalyse durchgeführt werden, welche als Grundlage zur Bewertung der Tragwerks- und Nachhaltigkeitspotenziale dient.

### 3.3 Vorgehensweise der Fallstudie

Die Fallstudie basiert auf dem Anwendungsfall eines mittelständischen Metallverarbeitungsunternehmens, dessen Produktionskapazitäten ausgeschöpft sind und daher erweitert werden müssen. Ziel der Untersuchung war die Entwicklung und Bewertung von zwei Produktionslayouts hinsichtlich ihrer Ökobilanz, Flächenversiegelung und Flexibilität. Dabei wurden folgende Varianten untersucht:

- **Variante A:** Vertikale Erweiterung des Bestandsgebäudes zur Schaffung zusätzlicher Produktionsfläche bei minimaler zusätzlicher Flächenversiegelung.
- **Variante B:** Neubau einer ebenen Produktionshalle, die zusätzliche Flächen benötigt, potenziell aber eine größere Flexibilität bietet.

Zu Beginn der Untersuchung wurden die spezifischen Anforderungen für die geplanten Produktionskapazitäten im Jahr 2030 definiert. Dies umfasste insbesondere die benötigten Flächen sowie die Produktionslasten, die in **Tabelle 2** dokumentiert sind.

Variante A			Variante B		
Name	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Flächenlasten [kN/m <sup>2</sup> ]	Name	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Flächenlasten [kN/m <sup>2</sup> ]
<b>Erdgeschoss</b>			Bearbeitungszentrum	94,32	5
Büro und Sozialräume	207,15	3	Büro und Sozialräume	210,83	3
Fertigwarenlager	281,32	30	Drehmaschine	99,99	7,7
Endkontrolle/Verpackung	134,32	5	Eckenbau	120,02	5
Bearbeitungszentrum	94,32	5	Endkontrolle/Verpackung	134,95	5
Kreuzschweißen/Fräsen	55,35	10	Fertigwarenlager	282,28	30
Kanten	54,31	30	Kanten	55,58	30
Wareneingang Stahl und Alu	157,98	30	Kreuzschweißen/Fräsen	55,67	10
Warenzuschnitt Alu	46	15	Roboter	157,06	15
Warenzuschnitt Stahl	57,14	15	Sonderbau	166,69	15
Verkehrswege	234,01	5	Stahlbau	207,69	15
<b>Gesamtfläche</b>	<b>1.321,9</b>		Standardbau	128,23	15

1. Obergeschoss			Verkehrsweg	64,11	5
Büro und Sozialräume	207,67	3	Wareneingang Stahl und Alu	165,24	30
Sonderbau	166,14	15	Warenzuschnitt Alu	45,99	15
Standardbau	128,43	15	Warenzuschnitt Stahl	57,77	15
Roboter	157,28	15	<b>Gesamtfläche</b>	<b>2.046,42</b>	
Eckenbau	120,7	5			
Stahlbau	207,07	15			
Verkehrswege	247,63	5			
Stahlbau	207,07	15			
Drehmaschine	99,99	7,7			
<b>Gesamtfläche</b>	<b>1.541,98</b>				

Tabelle 3.1: Produktions- und Flächenbedarf der Variante A und Variante B

Für beide Konzepte wurde analog zur Bestandsanalyse eine digitale Gebäudemodellierung durchgeführt. Mithilfe von ArchiCAD 27 [46] wurden geeignete digitale Gebäudemodelle erstellt, um die Tragwerksstruktur sowie die verwendeten Materialien zu erfassen. Die Modelle dienten als Datengrundlage sowohl zur Tragwerksanalyse als auch für die ökologische Bewertung.

Um eine umfassende Ökobilanzierung zu ermöglichen, wurden alle verwendeten Bauteile hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzungen und Schichtaufbauten analysiert und anhand der EPDs [29] bewertet. Beide Gebäude wurden dabei über einen Lebenszyklus von *80 Jahren* betrachtet und wie bei der Bestandsanalyse hinsichtlich des GWP, AP und des PERNT sowie der Ressourcennutzung untersucht.

Die Wahl des Betrachtungszeitraums von 80 Jahren basiert auf der massiven Tragstruktur des Gebäudes und der damit verbundenen Langlebigkeit. Diese Annahme ermöglicht eine realistische und vergleichbare Bewertung der ökologischen Auswirkungen beider Gebäudekonzepte.

Neben der ökologischen Analyse wurden für beide Varianten die maßgebenden Tragwerksnachweise für das Stahlbetontragwerk gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [48] geführt, um zum einen die technische Machbarkeit der vertikale Bestandserweiterung als auch die Potenziale eines ebenerdigen Neubaus zu prüfen.

### 3.3.1.1 Systemgrenzen

Für die durchgeführten Analysen wurden klare Systemgrenzen zur Bewertung beider Varianten definiert. Dabei wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich die graue Energie des Gebäudes anhand der eingesetzten Baustoffe untersucht.

Die Materialzusammensetzungen der Gebäude werden wie folgt unterteilt:

- Stahlbeton
- Mineralische Baustoffe (Gips und Mauerwerk)
- Mineralische Dämmmaterialien
- Glas
- Kunststoffe
- Polystyrol Dämmung

Nicht berücksichtigt wurden:

- Energiequellen für die Nutzung des Gebäudes (Strom- und Wärmeerzeugung)
- Erdaushub
- Transportwege der Baumaterialien
- der technische Innenausbau

Alle Baumaterialien wurden hinsichtlich der Herstellungsphase (A1-A3), der Entsorgungsphase (C1-4) und der Verwertungsphase (D) klassifiziert und dienen als Datengrundlage der Ökobilanzierung [27]. Die gewonnenen Ergebnisse dienen als fundierte Entscheidungsgrundlage zur Bewertung der Gebäude.

### 3.3.2 Bewertungskriterien

Zur Bewertung der Konzepte wurden die ermittelten Daten zunächst anhand der Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmengen über den Lebenszyklus hinweg betrachtet. Dabei wurden insbesondere die ökologischen Auswirkungen während der Errichtung sowie am Ende der Nutzungsdauer betrachtet und die Ergebnisse beider Varianten miteinander verglichen.

In Rahmen des Forschungsprojektes RE: STOCK INDUSTRY wurde in der Studie *"A Vertical Reuse Assessment Model for Industrial Building Stock: Structural and Circular Assessment at Early Design Stage"* [49] ein Bewertungsmodell für die vertikale Wiederverwendung von Industriegebäuden entwickelt. Die darin entwickelten Vertical Reuse Indicators (VRIs) dienen als systematische Bewertungsmethode für die Nachhaltigkeit und Effizienz von Gebäuden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die VRIs auf die entwickelten Gebäudekonzepte angewendet, um beide Varianten miteinander zu vergleichen.

Die Vertical Reuse Indicators (VRIs) werden wie folgt unterteilt:

- **Strukturerhalt (Structural Preservation, SP)**

Gibt an, welcher Anteil der bestehenden Tragstruktur erhalten bleibt.

$$SP = \frac{BS_a}{BS_e} \times 100 \text{ [\%]}$$

$BS_a$  = Volumen der tatsächlich erhaltenen Tragstruktur

$BS_e$  = Volumen der ursprünglich bestehenden Tragstruktur

- **Vertikale Erweiterung (Vertical Extension, VE)**

Bewertet die Traglastreserven des Gebäudes zur Bewertung einer möglichen Aufstockung.

$$VE = \frac{F_{RT}}{F_{RT,max}} \times 100 \text{ [\%]}$$

$F_{RT}$ : tatsächliche Last der vertikalen Erweiterung

$F_{RT,max}$ : maximale Traglastreserve der bestehenden Struktur

- **Unversiegelte Fläche (Unsealed Area, UA)**

Gibt die Flächenversiegelung des Grundstücks an.

$$UA = \frac{A_U}{A_P} \times 100\%$$

$A_u$ : nicht versiegelte Fläche des Grundstücks

$A_p$ : Gesamtfläche des Grundstücks

- **Layout-Flexibilität (Layout Flexibility, LF)**

Bewertet die Flexibilität des Layouts für Produktionsprozesse.

$$LF = \left(1 - \frac{|A_{opt} - A_{act}|}{A_{opt}}\right) \times \left(1 - \frac{N_c \cdot A_c}{A_{net}}\right) \times 100\%$$

$A_{opt}$ : optimale Rasterfläche für industrielle Nutzung

$A_{act}$ : tatsächliche Rasterfläche des bestehenden Gebäudes

$A_c$ : Grundfläche einer Stütze

$A_{net}$ : nutzbare Nettofläche ohne Hindernisse

$N_c$ : Anzahl der Stützen die das Layout einschränken

Durch die Kombination der Literaturrecherche, der Bestandsanalyse, der digitalen Modellierung, der statischen Nachweise sowie der Ökobilanzierung wurde eine umfassende Bewertungsgrundlage für die Nachhaltigkeit der untersuchten Gebäudekonzepte geschaffen. Die Anwendung der VRIs ermöglicht zudem einen differenzierten Vergleich hinsichtlich der Nachhaltigkeit und Effizienz beider Gebäudekonzepte [49].

## 4 Ergebnisse: Bestandsanalyse

Die Bestandsanalyse dient als Grundlage für die Bewertung der Erweiterungskonzepte des Gebäudes. Hierzu werden die wesentlichen Gebäudedaten zur Tragkonstruktion sowie zu den verwendeten Materialien und den ökologischen Eigenschaften dokumentiert.

### 4.1 Projektbeschreibung

Die Fallstudie basiert auf einem bestehenden Industriegebäude, welches im Jahr 1995 errichtet wurde. Zum Zeitpunkt der Errichtung mussten gemäß § 97 („Inhalt der Planunterlagen“) [50] der Niederösterreichischen Bauordnung folgende Unterlagen eingereicht werden:

- Lagepläne, Schnitte und Grundrisse des Gebäudes
- Tragwerksysteme mit einer statischen Vorberechnung
- Ansichten
- Darstellung der Wasser- und Energieversorgung
- Darstellung der Anlagen für Sanierung, Ableitung und Beseitigung von Abwässern und Abfällen.

Die Einreichung detaillierter statischer Berechnungen einschließlich der zugehörigen Konstruktionspläne war nur verpflichtend, wenn dies zur baupolizeilichen Beurteilung des Gebäudes erforderlich war. Aufgrund der fehlenden Verpflichtung zur digitalen Archivierung sind viele der Unterlagen heute oft nicht mehr verfügbar, was die Erstellung einer zuverlässigen Bestandsanalyse erheblich erschwert [50].

Für die durchgeführten Untersuchungen des Bestandsgebäudes wurden daher die verfügbaren Dokumente aus nachträglichen Sanierungs- und Umbaumaßnahmen herangezogen. Insbesondere die im Zuge einer thermischen Sanierung des Gebäudes im Jahr 2021 angefertigten Architekturpläne dienen dabei als wesentliche Grundlage.

Das untersuchte Gebäude besteht aus einem Bürogebäude mit einer anschließenden Industriehalle, die in zwei Hallenbereiche unterteilt ist (**siehe Abbildung 5**).

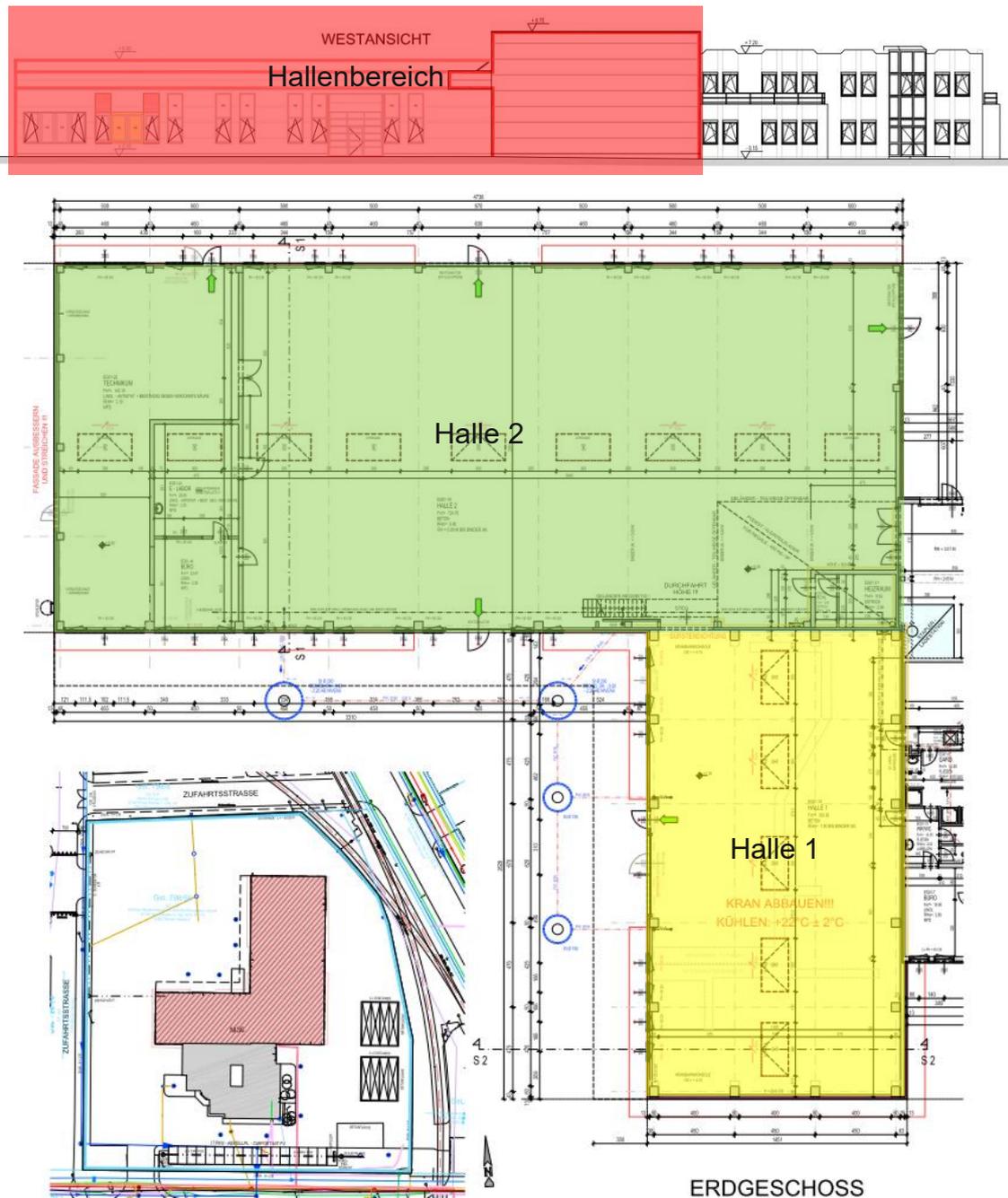


Abbildung 4.1: Westansicht und Grundriss des Bestandsgebäudes [51]

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus ausschließlich auf der Industriehalle, während das Bürogebäude sowohl in der Bestandsanalyse als auch in der Konzeptentwicklung nicht berücksichtigt wird. Die Industriehalle wird als eigenständiges Gebäude betrachtet und besteht aus einem massiven Stahlbeton-Rahmentragwerk mit eingespannten Stahlbetonstützen. Die Gebäudehülle setzt sich aus einer Leichtbaufassade mit Verbundpaneelen sowie einem Warmdachaufbau zusammen.

## 4.2 Gebäudedaten

Mithilfe des Energieausweises und den vorhandenen Architekturpläne konnten Rückschlüsse auf die verwendeten Baumaterialien gezogen werden. Ergänzend durch eine aktuelle Fotodokumentation des Gebäudes konnten fundierte Annahmen hinsichtlich des Tragwerks sowie der Gebäudehülle getroffen werden [52, 51].

<u>Baubeschreibung</u>	Industriehalle mit Büro- und Produktionsbereichen und zwei Hallenabschnitten mit unterschiedlichen Geschosshöhen
<u>Baujahr:</u>	1995
<u>Brutto- Geschossfläche (BGF):</u>	1.366,4 m <sup>2</sup>
<u>Gebäude-Hüllfläche:</u>	3.971,1 m <sup>2</sup>
<u>Brutto-Rauminhalt (BRI):</u>	9.993,70 m <sup>3</sup>
<u>Grundstücksfläche:</u>	8.117,36 m <sup>2</sup>
<b>Hallenkonstruktion:</b>	
<u>Dach:</u>	Warmdach mit einer tragenden Dachkonstruktion aus Trapezblech
<u>Binder:</u>	Die in Breitenrichtung spannenden Binder wurden als Stahl-Beton T-Binder ausgeführt. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spannweite Halle 2: 20,5m</li> <li>• Spannweite Halle1 : 13,5m</li> </ul>
<u>Stütze:</u>	Die Binder lagern auf Stahlbetonstützen eingespannt in Einzel- bzw. Köcherfundamenten.
<u>Außenwände:</u>	Die Außenfassade besteht aus vorgesetzten wärme gedämmten Verbundpaneelen (Iso-Paneelen).

Zwischen der Halle und dem Bürogebäude besteht die Wand aus beidseitig verputzten Hochlochziegeln  $d = 25\text{cm}$  bzw.  $12\text{ cm NF}$ -Ziegeln.

Innenwände:

Trennwände in den Hallen bestehen aus  $d = 25\text{cm}$  Hochloch-Mauerwerkswänden

Fenster:

Kunststofffenster mit 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung,  $U_g = 0,6\text{ W/m}^2\text{K}$

Lichtkuppeln

4-schalig,  $U_g = 1,5\text{ W/m}^2\text{K}$

Türen:

Alu-Glas-konstruktionen mit thermisch getrennten Profilen und 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung.  $U_g = 0,6\text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $U_f = 1,6\text{ W/m}^2\text{K}$

Sohle:

Stahlbetonsohle  $d = 20\text{ cm}$ , schwimmend gegründet, mit erdberührter Perimeterdämmung

Bodenpressung:

Die zulässige Tragfähigkeit des Baugrundes ohne Gutachten für Einzelfundamente mit  $\geq 1,40\text{ m}$  Breite und  $\geq 1,00\text{ m}$  Einbindetiefe  $\sigma_{R,d} = 604,5\text{ KN/m}^2$

Die gesamte Gebäudehülle der Halle wurde mit Verbundpaneelen modelliert, während Mischkonstruktionen aus Mauerwerkswänden und nachträglichen Blechverkleidungen im Bereich der Schnittstelle zum Bürogebäude nicht berücksichtigt wurden. Da keine detaillierten Informationen zu den technischen Ausbauten des Gebäudes vorlagen, wurden diese im Rahmen der Analysen ebenfalls nicht betrachtet.

### 4.3 Lastannahmen Bestand

Zur Bewertung der Tragreserven wurden die Lastannahmen für die Durchführung der Tragwerksnachweise gemäß ÖNORM B 1991-1-1:2020 [53] wie folgt festgelegt.

#### Eigengewicht

##### Dachaufbau Halle

Trapezprofil	$g_k = 0,20 \text{ kN/m}^2$
Dachhaut PVC-Abdichtung	$g_k = 0,03 \text{ kN/m}^2$
Dämmung $G = 0,01 \text{ kN/m}^3/\text{cm} \times 22 \text{ cm}$	$g_k = 0,22 \text{ kN/m}^2$
Dampfbremse SK-Folie	$g_k = 0,02 \text{ kN/m}^2$
Installationslasten (Technik)	<u><math>g_k = 0,05 \text{ kN/m}^2</math></u>
	$g_k = 0,52 \text{ kN/m}^2$

optionale Last für PV- Anlage  $g_k = 0,25 \text{ kN/m}^2$

##### Fassade:

Sandwichpaneel-Fassade auf Riegelkonstruktion  $g_k = 0,50 \text{ kN/m}^2$

##### Sohle Halle:

Stahlfasersonhle 20cm  $g_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$

#### Nutzlasten:

Nutzlasten Lagerraum Halle  $q_k = 10,00 \text{ kN/m}^2$

#### Wind- und Schneelasten:

##### Gebäude Standort:

PLZ: 2351  
Ort: Wiener Neudorf

## 4.4 Tragwerk

Die Tragstruktur des Gebäudes besteht aus einem Stahlbeton-Skelettbau, aus Stahlbetonrahmenkonstruktionen, welche in Stahlbeton-Köcherfundamenten eingespannt sind (**siehe Abbildung 7**).

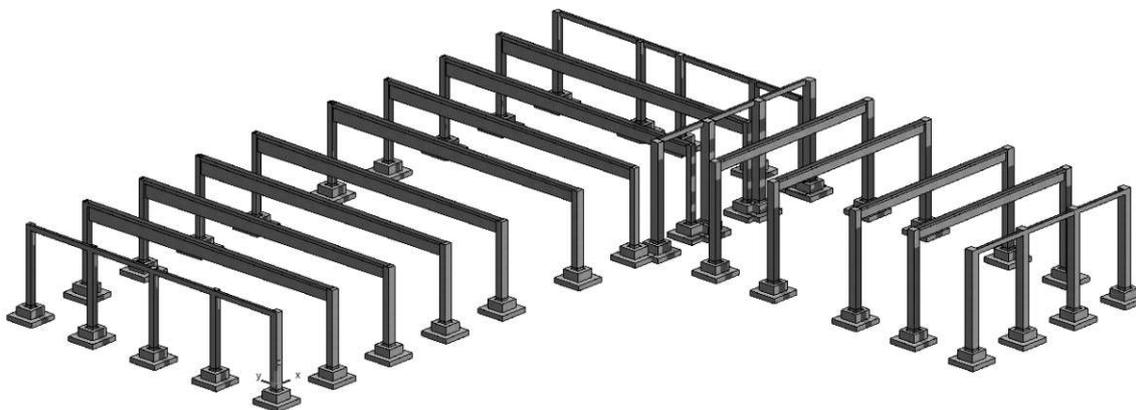
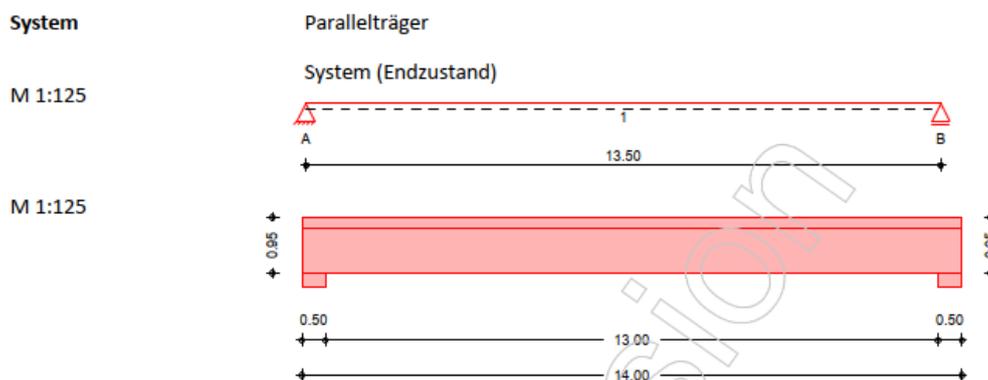


Abbildung 4.2: Darstellung des Tragwerksystems des Bestandsgebäudes [46]

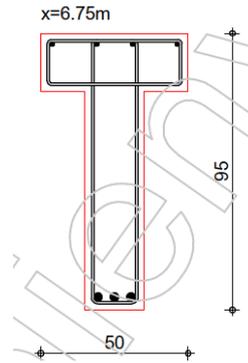
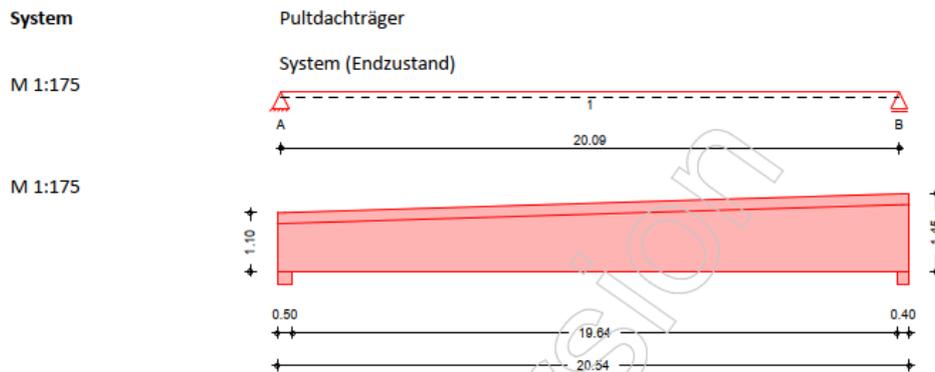
Mithilfe der Architekturpläne sowie der Fotodokumentation, konnten die Bauteilabmessungen des Tragwerkes zuverlässig bestimmt werden. Da keine statischen Angaben zum Tragwerk des Gebäudes vorlagen, wurden die Bewehrungsgrade sowie die Betondeckung und die Expositionsklassen der tragenden Stahlbetonbauteile mit Hilfe der ÖNORM EN 1992-1-1 [48] ermittelt. Zur Ermittlung der Bewehrungsgrade wurden zusätzlich die Datenblätter für konstruktive Fertigteile der Firma Oberndorfer [54] herangezogen. Anhand der durchgeführten Untersuchungen ergeben sich gemäß **Tabelle 3** folgende Querschnittswerte und Bewehrungsgrade für die tragenden Bauteile:

### Stb.- Dachbinder Halle 1:

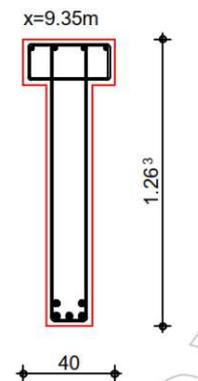
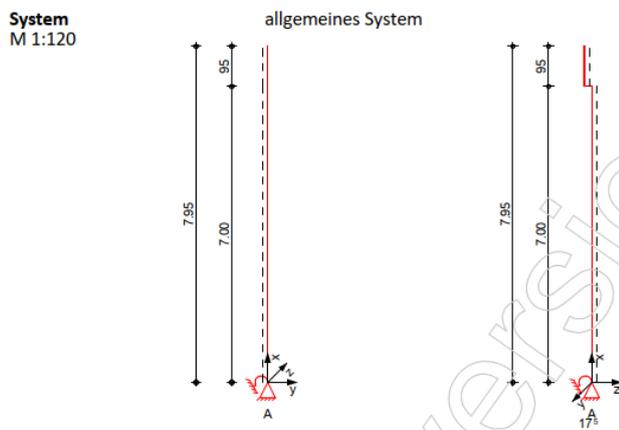


Querschnittswerte:

Material:	C 35/45
oben:	4Ø16
unten:	3Ø28
$A_{s,o}$ :	8.0 cm <sup>2</sup>
$A_{s,u}$ :	18.5 cm <sup>2</sup>
Bügel:	Ø10/30.0
Schnittig:	2

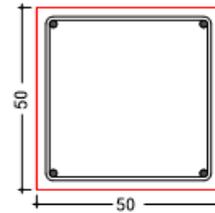
Stb.- Dachbinder Halle 2:Querschnittswerte

Material:	C 35/45
oben:	4Ø16
unten:	5Ø28
$A_{s,o}$ :	8.0 cm <sup>2</sup>
$A_{s,u}$ :	30.8 cm <sup>2</sup>
Bügel:	Ø10/30.0
Schnittig:	2

Stb. - Kragstütze 50x50 cm Halle 1

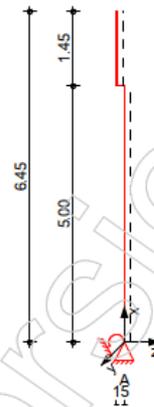
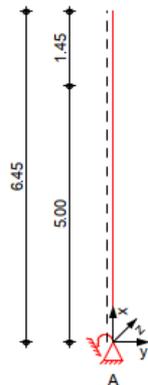
Querschnittswerte

Material:	C 35/45
Längsstäbe	4Ø20
Querkraftbewehrung:	Ø10/20.0
$A_{s,ges}$ :	12,57 cm <sup>2</sup>
$A_{sw}$ :	7.85 cm <sup>2</sup>

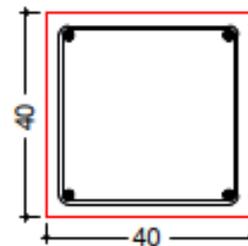
Stb. - Kragstütze 40x40 cm Halle 2

System  
M 1:120

allgemeines System

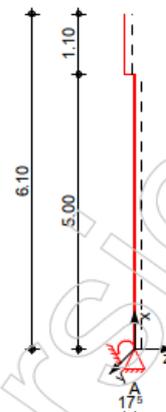
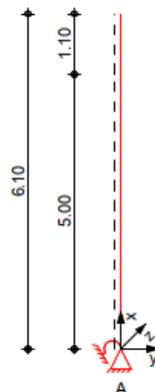
Querschnittswerte

Material:	C 35/45
Längsstäbe	4Ø20
Querkraftbewehrung:	Ø10/20.0
$A_{s,ges}$ :	12,57 cm <sup>2</sup>
$A_{sw}$ :	7.85 cm <sup>2</sup>

Stb.- Kragstütze 50x50 cm Halle 2

System  
M 1:120

allgemeines System



### Querschnittswerte

Material:	C 35/45
Längsstäbe	4Ø20
Querkraftbewehrung:	Ø10/20
$A_{s,ges}$ :	12,57 cm <sup>2</sup>
$A_{sw}$ :	7,85 cm <sup>2</sup>

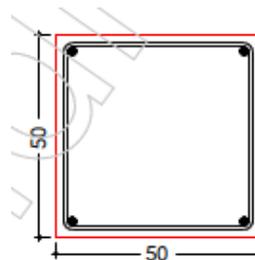


Tabelle 4.1: Querschnittswerte des Bestandstragwerk Abbildungen gemäß [47]

Für die erfassten Querschnittsabmessungen sowie den gewählten Bewehrungsgraden der tragenden Bauteile ergeben sich die Auslastungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) sowie der Gebrauchstauglichkeit (GZG) gemäß der EN 1992-1-1 2020 [48] wie folgt:

Träger	Tragwerksnachweise gemäß EN 1992-1-1		
	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)		Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)
	Spannungsnachweis $\eta$ [-]	Verformungsnachweis $\eta$ [-]	Druckstrebe $\eta$ [-]
Stb.- Dachbinder Halle 1:	0,53	0,59	0,23
Stb.- Dachbinder Halle 2:	0,57	0,82	0,29
Stützen	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)		
	Bruchschnittgrößen $\eta$ [-]		
	Stb. - Kragstütze 50x50 cm Halle 1	0,57	
	Stb. - Kragstütze 40x40 cm Halle 2	0,56	
Stb. - Kragstütze 50x50 cm Halle 2	0,29		

Tabelle 4.2: Tragwerksnachweise des Bestandsgebäudes gemäß EN 1992-1-1 2020 [47]

Die Tragwerksnachweise zeigen, dass die Dachbinder in Halle 2 mit einer Auslastung von  $\eta = 0,82$  maßgebend für die Planung einer vertikalen Erweiterung sind, wohingegen die Stützen mit einer Auslastung von maximal  $\eta = 0,57$  hohe Lastreserven aufweisen.

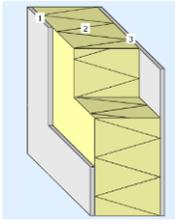
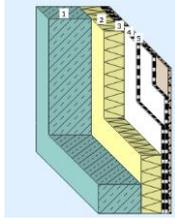
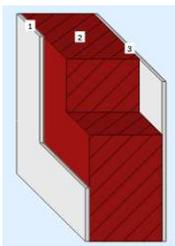
## 4.5 Gebäudedaten

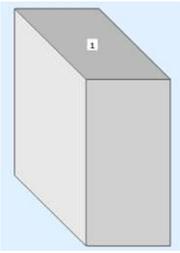
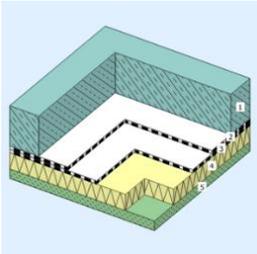
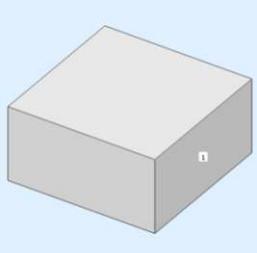
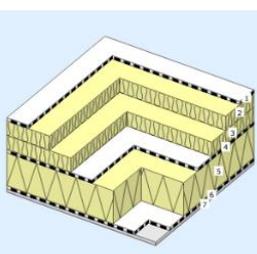
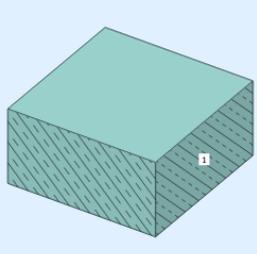
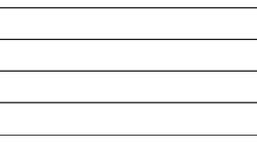
Basierend auf den Architekturplänen und den durchgeführten Tragwerksnachweisen wurde ein digitales Gebäudemodell entwickelt, um eine detaillierte Erfassung sämtlicher Massen, Materialien und Oberflächen des Bestandsgebäudes zu ermöglichen.



Abbildung 4.3: Gebäudemodell des Bestandsgebäudes [46]

Alle vorhandenen Bauteile sind in **Tabelle 5** hinsichtlich ihrer Aufbauten wie folgt dargestellt:

BT1: Iso-Außenwandpaneel	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Blech	0,008	
	PU-Paneel	0,12	
	Blech	0,008	
	Stahlprofil C 180	0,18	
BT2: Stahlbeton-Sockelelement (Frostschürze)	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Stahlbeton	0,04	
	Wärmedämmung XPS	0,07	
	Stahlbeton	0,18	
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Gipsputz	0,0125	
	HLZ 25	0,25	
	Gipsputz	0,0125	

BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Gipskartonplatte	0,0125	
	CW-Profil DZW. MW-W	0,1	
	Gipskartonplatte	0,0125	
BT5: Hallenboden	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Stahlbetonsohle	0,25	
	E-KV-5 ABDICHTUNG	0,005	
	E-KV-5 ABDICHTUNG	0,005	
	XPS	0,1	
	SAUBERKEITSSCHICHT	0,06	
BT6: Abgehängte Decke	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Gipskarton	0,0125	
	UK aus Stahlprofilen	-	
BT7: Warmdach	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Kunststoffabdichtung Broof T1	0,002	
	EPS Dämmung	0,1	
	Bituminöse Abdichtung	0,008	
	EPS Dämmung	0,12	
	Dampfbremse	0,001	
	Trapezblech 160/250	0,01	
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	<b>Material</b>		
	Köcherfundamente		
	Stahlbetonstütze 0,4x0,4m		
	Stahlbetonstütze 0,5x0,5m		
	Stahlbetonstütze 0,5x0,6m		
	Decke über HA-Raum		
	Randbalken 0,2x0,4m		
	Stahlbetonbinder T-Träger schräg		
BT9: Vordach Innenhof	<b>Material</b>	<b>Stärke [m]</b>	
	Trapezblech	0,01	
	Doppel T-Träger HEA 240	0,24	
	U 180 Profil	0,18	
	Blech	0,008	
	PU-Paneel	0,12	
	Blech	0,008	
BT10: Fenster- und Türelemente	<b>Material</b>	<b>Stck</b>	
	AF 450/220	3	
	AF 110/345	3	
	AF 1,1/3,47	15	
	Eingangstür Glas 1,30/3,0	1	
	Glas-Türelement	1	
	DF 1,5/3,0	14	

BT11: Tor- und Türelemente	Material	Stck
	Sektionaltor 3,7 x 4,42 m	2
	Sektionaltor 6,0 x 4,42 m	3
	Brandschutz Schiebetor T30	1
	Stahltür 2,0/2,6 m	2
	Stahltür 0,80/2,00 m	4
	Stahltür 0,9/2,00 m	1
	Stahltür 1,10/2,00 m	2

Tabelle 4.3: Bauteilaufbauten des Bestandsgebäudes: Abbildungen gemäß [25]

## 4.6 Umweltauswirkungen Bestand

Basierend auf den dokumentierten Bauteilen ergeben sich die Gesamtmassen des Gebäudes zu **2.020,96 t**. Diese wurden in **Tabelle 6** hinsichtlich ihres Recyclingpotenzials und Abfallaufkommen unterteilt.

Gesamt Recycling vs. Abfall	Recyclingmassen [t]	Abfallmassen [t]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	2,79	173,53
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	43,14	43,51
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	16,15	21,20
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	-	0,74
BT5: Hallenboden	491,86	508,48
BT6: Abgehängte Decke	1,18	3,44
BT7: Warmdach	55,87	71,07
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	277,86	277,86
BT9: Vordach Innenhof	13,19	13,52
BT10: Fenster- und Türelemente	0,55	5,87
BT11: Tor- und Türelemente	0,09	0,28
<b>Summe</b>	<b>902,68</b>	<b>1.119,50</b>
<b>Anteil</b>	<b>0,45</b>	<b>0,55</b>

Tabelle 4.4: Recycling- und Abfallpotenzial des Bestandsgebäudes [25]

Die Analyse der anfallenden Recycling- und Abfallmassen zeigt, dass bei einem Rückbau des Gebäudes etwa 45 % der Gesamtmasse recyclebar sind, während 55 % an Abfall entstehen. Insbesondere die Stahlbetonfertigteile (BT 8) mit **277,86 t** und der Hallenboden (BT 5) mit **491,86 t** stellen den größten Anteil an recycelbarem Material dar. Gleichzeitig verursachen sie jedoch mit **277,86 t** und **508,48 t** auch den größten Anteil der anfallenden Abfallmassen. Auch die Außenfassade (BT 1) trägt mit **173,53 t** erheblich zum Abfallaufkommen bei, da die verwendeten Materialien, insbesondere die PUR-Dämmung, nur schwer recycelbar sind.

Zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen wurden die verwendeten Materialien mithilfe der entsprechenden EPDs [29] in Bezug auf die Herstellungs- (A1- A3), Abbruch- (C1- C4) und Recyclingphase (D) unterteilt und wie folgt in den **Abbildungen 8-10** ausgewertet.

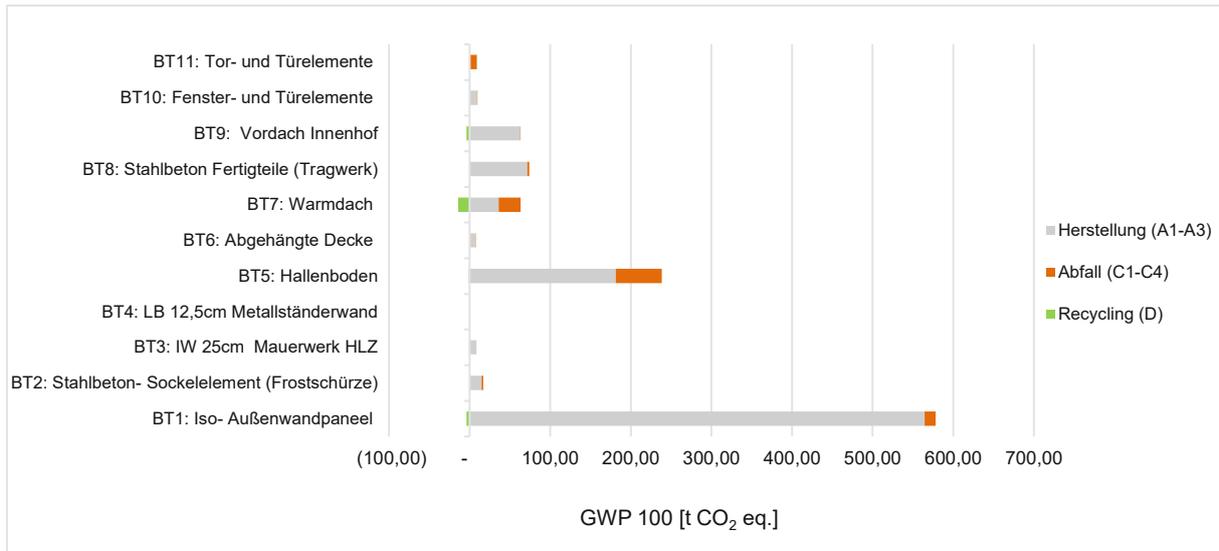


Abbildung 4.4: GWP der Bestandsmassen, unterteilt in Herstellungs-, Abbruch- und Recyclingphase

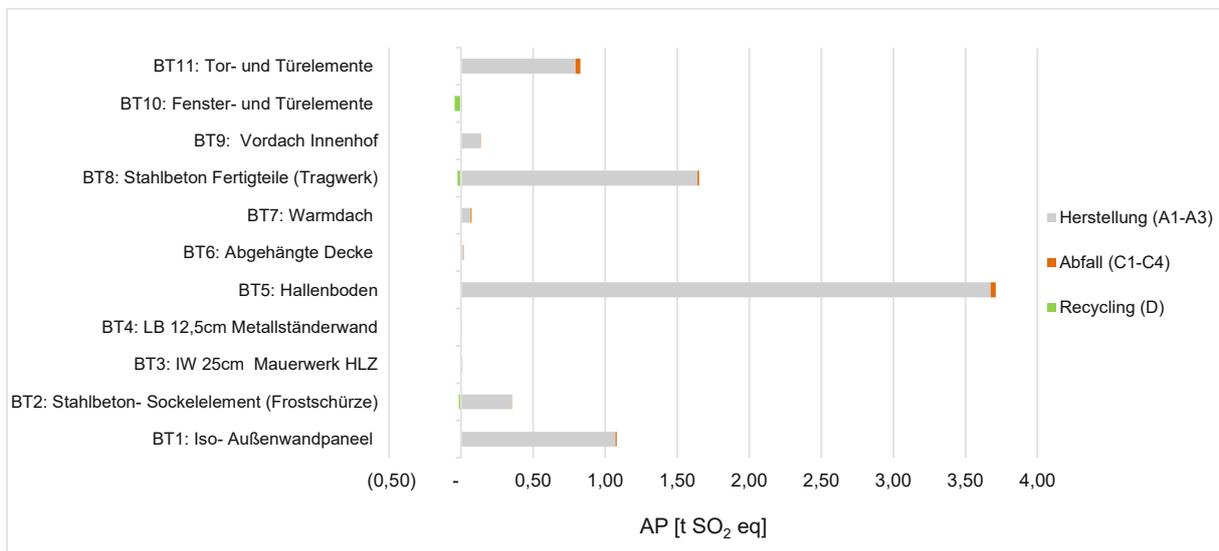


Abbildung 4.5: AP der Bestandsmassen, unterteilt in Herstellungs-, Abbruch- und Recyclingphase

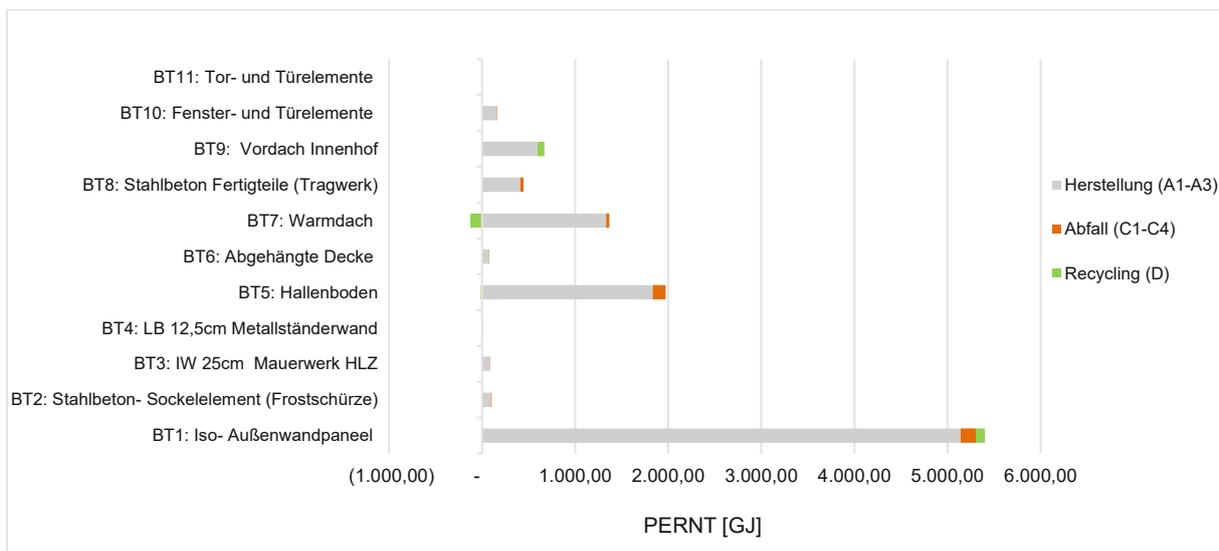


Abbildung 4.6: PERNT der Bestandsmassen, unterteilt in Herstellungs-, Abbruch- und Recyclingphase

Die Analysen zeigen, dass sowohl beim GWP und AP als auch beim PERNT die Herstellungsphase der Materialien den größten Einfluss auf die Umwelt hat. In den Diagrammen wird zudem deutlich, dass die Außenfassade (BT 1) hinsichtlich des GWP sowie dem PERNT den größten Anteil ausmacht. Das größte Versauerungspotenzial (AP) haben hingegen die Stahlbetonelemente bestehend aus dem Hallenboden (BT 5) sowie den Stahlbeton-Fertigteilen (BT 8). Die genauen Werte der jeweiligen Bauteile können dem **Anhang 2.2** entnommen werden.

Die Ergebnisse der Bestandsanalyse zeigen auf, dass die massive Tragkonstruktion bestehend aus dem Stahlbetontragwerk, zusammen mit dem Hallenboden und der Außenfassade den Großteil der Massen sowie der CO<sub>2</sub>-Äquivalenten des Gebäudes ausmachen. Hierbei fällt auf, dass die Außenfassade trotz des geringen Massenanteils aufgrund der energieintensiven Herstellung der PUR-Dämmung sowie der metallischen Deckschichten für den Großteil der CO<sub>2</sub>-Äquivalente sorgt.

## 5 Ergebnisse: Vergleichsstudie

Im folgenden Kapitel werden die entwickelten Gebäudekonzepte für eine vertikale Bestandserweiterung sowie für den Abriss und Neubau des Gebäudes hinsichtlich der Umsetzbarkeit sowie der ökologischen Eigenschaften untersucht.

### 5.1 Variante A: Vertikale Erweiterung

Für die vertikale Erweiterung wurde basierend auf dem Grundriss des Bestandsgebäudes ein digitales Gebäudemodell entwickelt, das die festgelegten Produktionsanforderungen erfüllt. Das Ziel war es, die vorhandene Baustruktur zu erhalten und eine möglichst nachhaltige Erweiterungsmethode zu definieren, ohne zusätzliche Flächen zu versiegeln.

#### 5.1.1 Tragsystem Variante A

Für die vertikale Erweiterung des Gebäudes wurde das bestehende Stahlbetontragwerk aufgrund der großen Spannweiten von bis zu 20,5 m strukturell verstärkt. In beiden Hallenteilen wurde im Erdgeschoss eine zusätzliche, mittig angeordnete Stützenreihe ergänzt, um die geforderten Lasten aus dem Obergeschoss ableiten zu können. Zudem wurde für die Geschosdecke eine massive Deckenkonstruktion gewählt (**siehe Abbildung 11**).

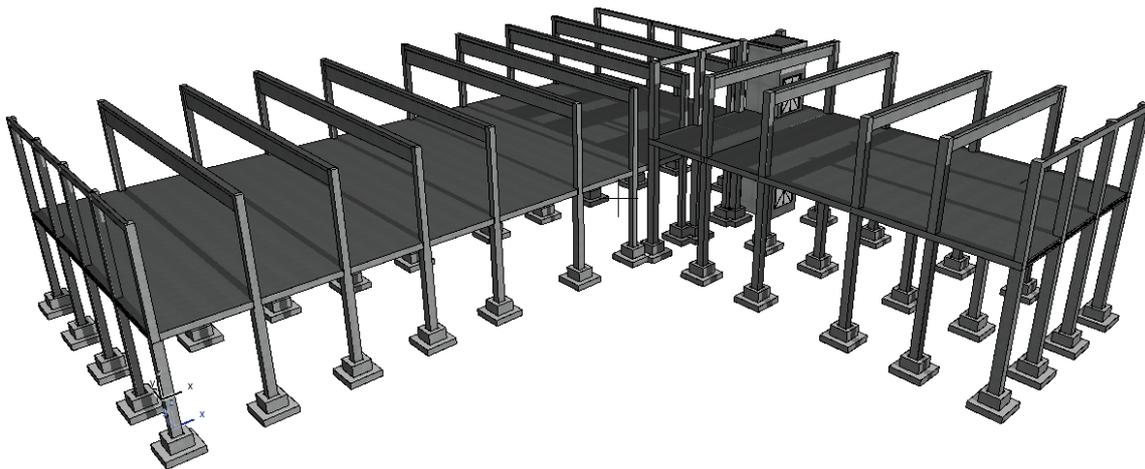


Abbildung 5.1: Darstellung des Tragwerksystems der Variante A [46]

Die Geschosdecke wurde als Spannbeton-Hohlkammerdecke konzipiert und fungiert als Sekundärtragwerk. Im Vergleich zu schlaff bewehrten Betondecken bieten diese

höhere Tragfähigkeiten bei gleichzeitig reduzierter Eigenlast. Das Haupttragwerk der Geschosdecke wird mit deckengleichen Verbundträgern realisiert, um die Geschosshöhe nicht zusätzlich einzuschränken. Durch die Kombination der Hohlkammerdeckenelemente zusammen mit den Verbundträgern entsteht eine ebene Deckenkonstruktion, mit der folgende Achsraster im Erdgeschoss realisiert werden können.

- Halle 1: 5 x 10
- Halle 2: 6,75 x 10

Mit Hilfe der Bemessungstools von DW-Systembau [55] wurde eine Vorbemessung der Decken durchgeführt, bei der diese mit einer maximalen Auflast von  $g_k = 5,00 \text{ kN/m}^2$  und einer Verkehrslast von  $q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2$  belastet werden konnten (**siehe Abbildung 12**).

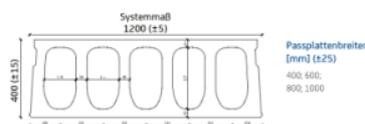
#### Einwirkungen

Kategorie	E - Lagerräume	
Feld	Verkehrslast $q_1$ :	7.50 $\text{kN/m}^2$
	LW-Zuschlag $q_2$ :	0.00 $\text{kN/m}^2$
	Zus. Auflast $g_2$ :	5.00 $\text{kN/m}^2$
	Eigenlast Decke $g$ :	5.04 $\text{kN/m}^2$
	Belastung $q/g$ :	7.50 $\text{kN/m}^2$ 10.04 $\text{kN/m}^2$

#### Bemessung

Bewehrung A40V/X10-S2

A40V 400 mm



Deckenart:	Hohlplatte
Deckentyp:	A40V
Deckendicke:	40cm
az,oben(mm <sup>2</sup> /m):	104.00
az,unten(mm <sup>2</sup> /m):	930.00

#### Nachweis der Biegetragfähigkeit

Feldmoment  $M_{Ed}$  146.19  $\text{kNm/m}$   $\leq$   $M_{Rd}$  358.05  $\text{kNm/m}$  = Ausnutzung 40.8%

#### Nachweis der Querkraftfähigkeit

Auflager A	$V_{Ed,ct1}$	85.16 $\text{kN/m}$	$\leq$	$V_{Rd,ct1,bw}$	83.96 $\text{kN/m}$	= Ausnutzung	101.4% *
	$V_{Ed,n}$	55.07 $\text{kN/m}$	$\leq$	$V_{Rd,n}$	55.12 $\text{kN/m}$	= Ausnutzung	99.9%
	$V_{Ed,ct2}$	0.00 $\text{kN/m}$	$\leq$	$V_{Rd,ct2}$	94.28 $\text{kN/m}$	= Ausnutzung	0.0%
	Unterstützung der Träger: Nein		Verbundsteigernde Massnahmen: Ja				
Trägerposition: Mitte							
Auflager B	$V_{Ed,ct1}$	85.16 $\text{kN/m}$	$\leq$	$V_{Rd,ct1,bw}$	83.96 $\text{kN/m}$	= Ausnutzung	101.4% *
	$V_{Ed,n}$	55.07 $\text{kN/m}$	$\leq$	$V_{Rd,n}$	55.12 $\text{kN/m}$	= Ausnutzung	99.9%
	$V_{Ed,ct2}$	0.00 $\text{kN/m}$	$\leq$	$V_{Rd,ct2}$	94.28 $\text{kN/m}$	= Ausnutzung	0.0%
	Unterstützung der Träger: Nein		Verbundsteigernde Massnahmen: Ja				
Trägerposition: Mitte							

#### Durchbiegung

vorhandene Durchbiegung ( $L/5624$ ) = 1.22 mm zul. Durchbiegung  $L/500$  = 13.73 mm

Abbildung 5.2: Vorbemessung der Geschosdecke: Variante A [55]

Zur Bewertung der Auslastung der bestehenden Stahlbetonstützen im Erdgeschoss, wurde die 40 x 40 cm Stütze in Halle 2 herangezogen. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Lasten durch die Geschosdecke sowie der Rahmenkonstruktion im Obergeschoss ergibt sich eine Stützenauslastung von  $\eta = 0,63$ .

Um die bestehende Tragstruktur weitestgehend zu erhalten, wurden die Dachbinder in der Dachebene wiederverwendet. Da die Verbindungen der Dachbinder auf den Stützen als Gabellagerung ausgeführt wurden, ist eine detaillierte Untersuchung der Anschlüsse erforderlich, um die Wiederverwendung fundiert bewerten zu können.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Vorbemessungen zur Einschätzung des Potenzials des gewählten Tragwerkskonzepts, ersetzen keine vollumfängliche Gebäudestatik. Für die endgültige Umsetzung des Tragwerks werden weitere statische Berechnungen im Rahmen der Gebäudestatik sowie der Detailstatik benötigt. Dies umfasst sowohl eine nähere Untersuchung der Anschlussdetails als auch die Bewertung der Demontagefähigkeit der bestehenden Tragwerksverbindungen.

Die Untersuchung des Tragwerks zeigt, dass trotz signifikanter Eingriffe in die Tragstruktur und der damit verbundenen Einschränkungen der Flexibilität im Erdgeschoss die Auslastung im Obergeschoss begrenzt ist.

### 5.1.2 Variante A: Gebäudedaten

Für die Aufstockung des Gebäudes ergeben sich die folgenden Gebäudedaten:

<u>Brutto- Geschossfläche EG (BGF):</u>	1.366,4 m <sup>2</sup>
<u>Brutto-Geschossfläche OG (BGF):</u>	1.366,4 m <sup>2</sup>
<u>Brutto-Rauminhalt (BRI):</u>	17.140,42 m <sup>3</sup>
<u>Nettogrundfläche a (NGFa):</u>	2.648,67 m <sup>2</sup>

Das Gebäude wurde mit dem Fokus auf den Erhalt der Bestandsstruktur entwickelt, um eine möglichst nachhaltige Aufstockung zu realisieren. Neben dem Tragwerk wurden auch wesentliche Elemente der Gebäudehülle erhalten. Dazu gehören die Außenfassade, die Fenster sowie das Trapezblech der Dachfläche, die bereits 2021 im Rahmen der Sanierungsarbeiten erneuert wurden. Aufgrund dessen, dass bei der Demontage dennoch Abfälle entstehen und einzelne Elemente nicht wiederverwendet werden können, wurden die Abfallmengen wie folgt festgelegt:

- Iso-Paneel Fassade 20 %
- Sockelelemente 20 %
- Stahlbetonfertigteile 10 %

Zudem ist es notwendig, den Hallenboden in beiden Hallenteilen zu entfernen, um die zusätzliche Stützenreihe für die vertikale Erweiterung herstellen zu können. Unter Berücksichtigung der Bestandsstruktur sowie der wiederverwendeten Materialien ergeben sich die anfallenden Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmassen im Zuge der vertikalen Erweiterung gemäß **Abbildung 13** wie folgt.

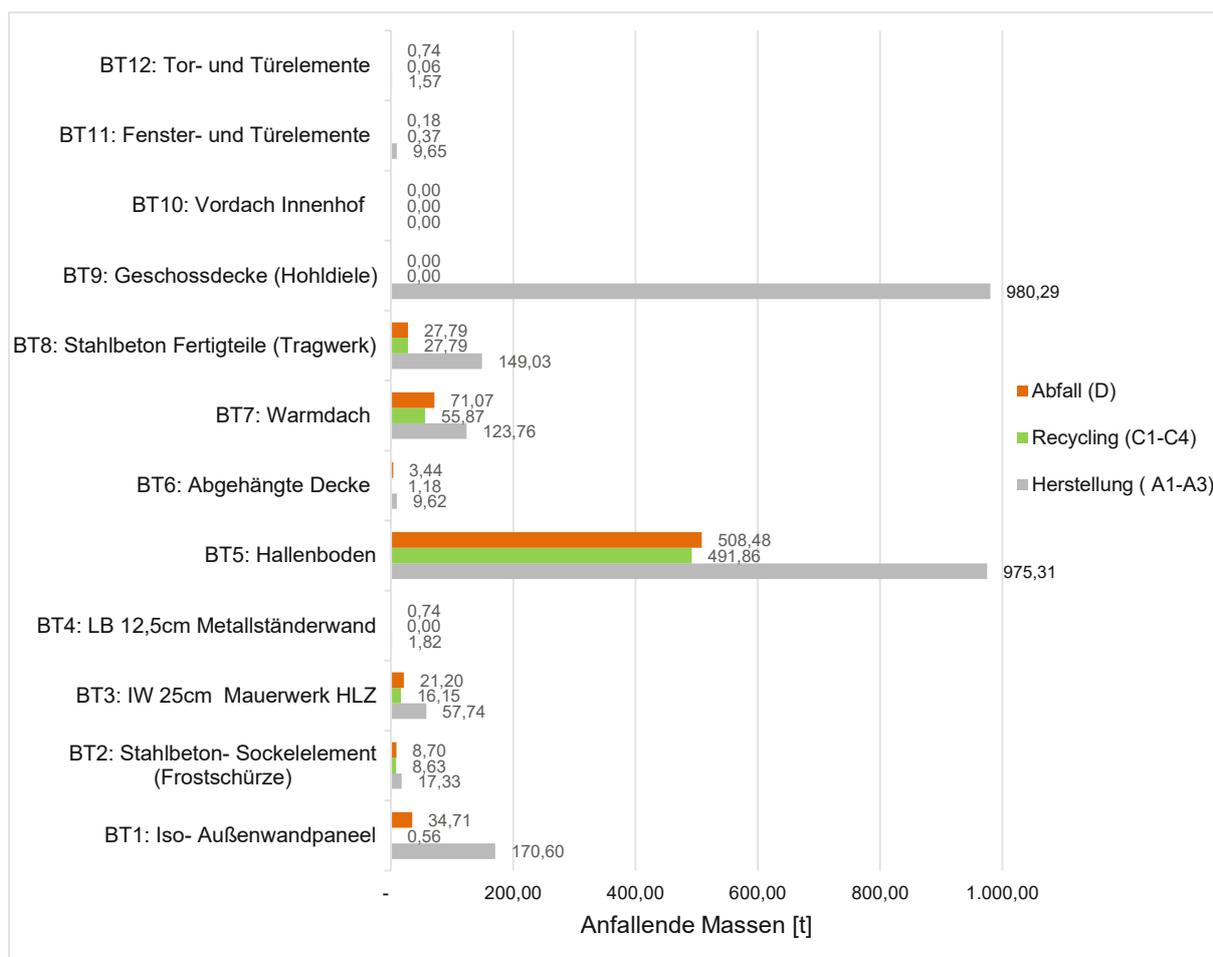


Abbildung 5.3: Anfallende Massen für die Errichtung der Variante A, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling

Durch den Erhalt der Tragstruktur und die Wiederverwendung der Außenwände konnte die Gesamtmasse des Gebäudes von  $3.211,13 \text{ t}$  auf  $2.496,72 \text{ t}$  für die Umsetzung der vertikalen Erweiterung reduziert werden. Dies entspricht einer Einsparung von etwa 22% im Vergleich zum vollständigen Neubau des Gebäudes. Zusätzlich fallen  $677,05 \text{ t}$  an Abfallmassen sowie  $602,45 \text{ t}$  an Recyclingmassen für die nicht wiederverwendbaren Baumaterialien im Zuge der vertikalen Erweiterung an.

Neben der Einsparung der Errichtungsmassen zeigt sich, dass der Rückbau des Hallensoles den größten Anteil der Abfall- und Recyclingmassen ausmacht. Die anfallenden Abfall- und Recyclingmassen der Sohle entsprechen gemeinsam in etwa den Massen, die für die Errichtung der neuen Hallensole benötigt werden.

Über den gewählten Lebenszyklus von 80 Jahren ergeben sich die Gesamtmassen am Ende der Lebensdauer wie folgt:

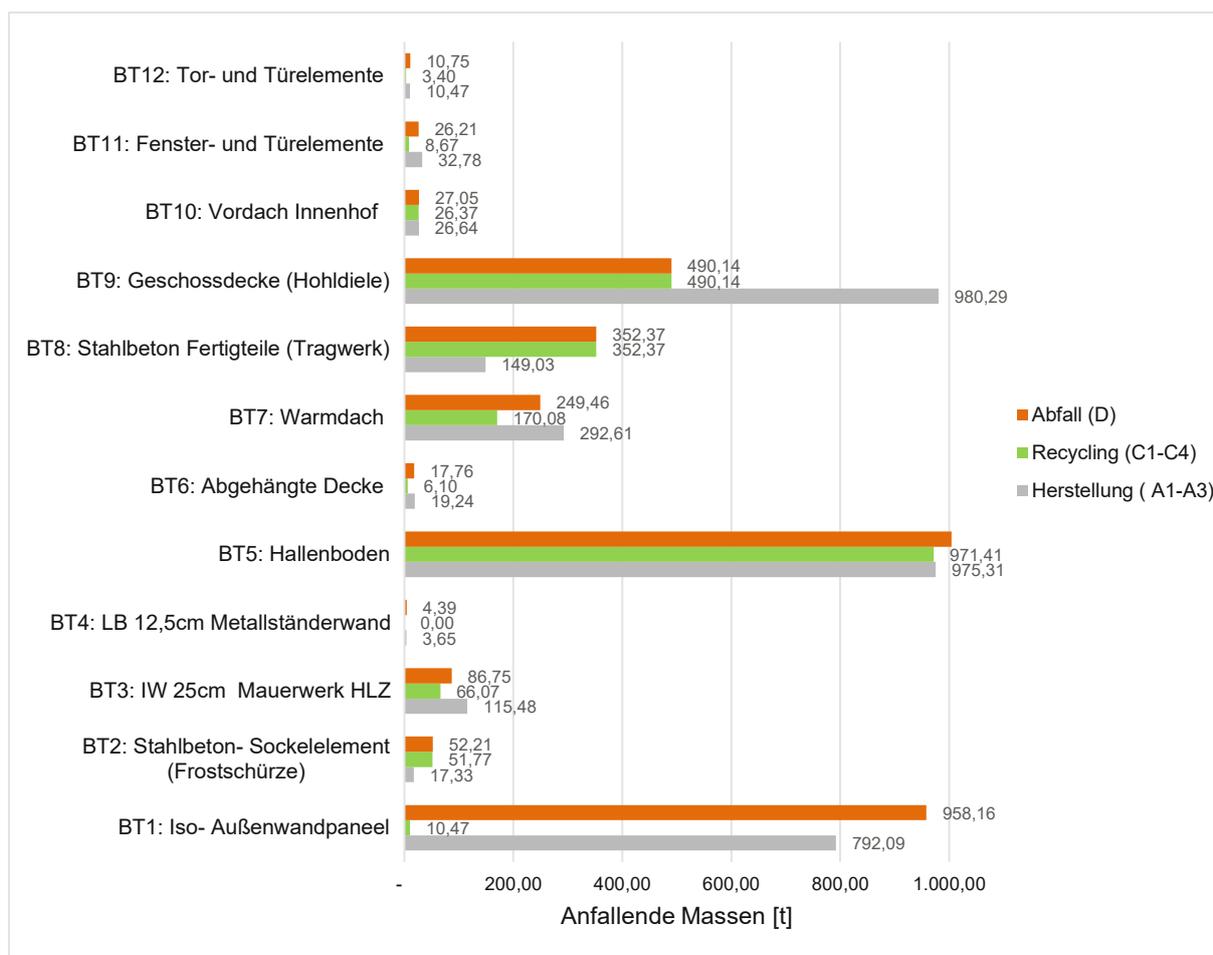


Abbildung 5.4: Anfallende Massen am Ende des Lebenszyklus der Variante A, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling

Das Balkendiagramm in **Abbildung 14** verdeutlicht erneut den signifikanten Einfluss der Außenfassade. Da diese über den Lebenszyklus mehrmals ertüchtigt werden muss, entstehen dabei große Herstellungsmassen von  $792,09\ t$  sowie  $958,16\ t$  an Abfallmassen. Die höheren Abfallmengen entstehen dabei vor allem durch den Erhalt der Außenfassade im Zuge der Aufstockung, welche beim Rückbau entsprechend als Abfallmassen hinzukommen. Während sich die Herstellungsmassen der massiven Bauteile über den Lebenszyklus hinweg nicht verändern, bleiben diese zusammen mit der Außenfassade die relevanten Bauelemente hinsichtlich der Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmassen. Zudem führt die Berücksichtigung des Rückbaus dazu, dass am Ende der Lebensdauer sowohl die Recycling- als auch die Abfallmassen signifikant ansteigen.

### 5.1.3 Variante A: Umweltauswirkungen

Für die Bewertung der Umweltauswirkungen des Gebäudes, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Herstellungsphase (A1-A3), die Entsorgung (C1-C4) und die Verwertung (D) der verwendeten Materialien untersucht. Die Analyse erfolgte zum einen für die Errichtung der vertikalen Erweiterung sowie für das Ende der Lebensdauer des Gebäudes.

	Errichtung			End of Life (80 Jahre)		
	GWP [t CO <sub>2</sub> eq.]	AP [t SO <sub>2</sub> eq.]	PERNT [GJ]	GWP [t CO <sub>2</sub> eq.]	AP [t SO <sub>2</sub> eq.]	PERNT [GJ]
<b>Herstellung (A1-A3)</b>	1.005,46	11,21	10.610,29	3.090,83	15,78	34.219,07
<b>Abfall (C1-C4)</b>	91,94	0,07	218,16	291,30	0,21	1.234,85
<b>Recycling (D)</b>	-16,16	- 0,10	- 12,57	- 60,14	- 0,34	641,11
<b>Gesamt</b>	<b>1.081,24</b>	<b>11,17</b>	<b>10.815,89</b>	<b>3.321,99</b>	<b>15,72</b>	<b>36.095,03</b>

Tabelle 5.1: GWP, AP und PERNT der vertikalen Erweiterung für die Errichtung sowie am Ende der Lebensdauer: Variante A [26]

In **Tabelle 7** wird nochmals der Einfluss der Herstellungsphase (A1-A3) verdeutlicht, da diese im Vergleich zu den Entsorgungs- und Verwertungsprozessen den größten Anteil an den Umweltauswirkungen ausmacht. Zur besseren Veranschaulichung wurden die CO<sub>2</sub>-Äquivalenten für die Errichtung der vertikalen Erweiterung in **Abbildung 15** nach Baumaterialien unterteilt, um die Einflüsse der jeweiligen Bauteile bewerten zu können.

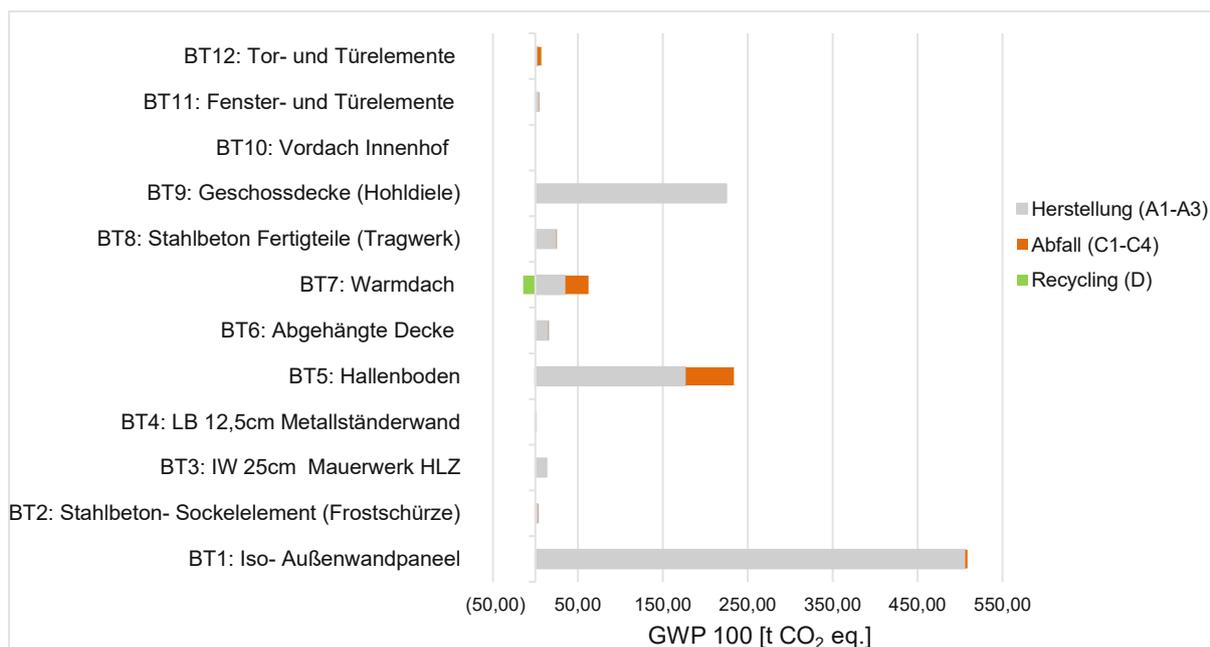


Abbildung 5.5: GWP der vertikalen Erweiterung auf Bauteilebene - Errichtungszeitpunkt: Variante A

Analog zu den Analysen des Bestandsgebäudes zeigt sich auch in **Abbildung 15**, dass insbesondere die Außenfassade einen maßgebenden Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Äquivalenten hat. Zusammen mit dem Hallenboden sowie der Geschossdecke aus Stahlbeton, machen diese im Zuge der Errichtungsphase mit insgesamt **965,18 t CO<sub>2</sub>-eq** den Hauptanteil der Umweltbelastung aus.

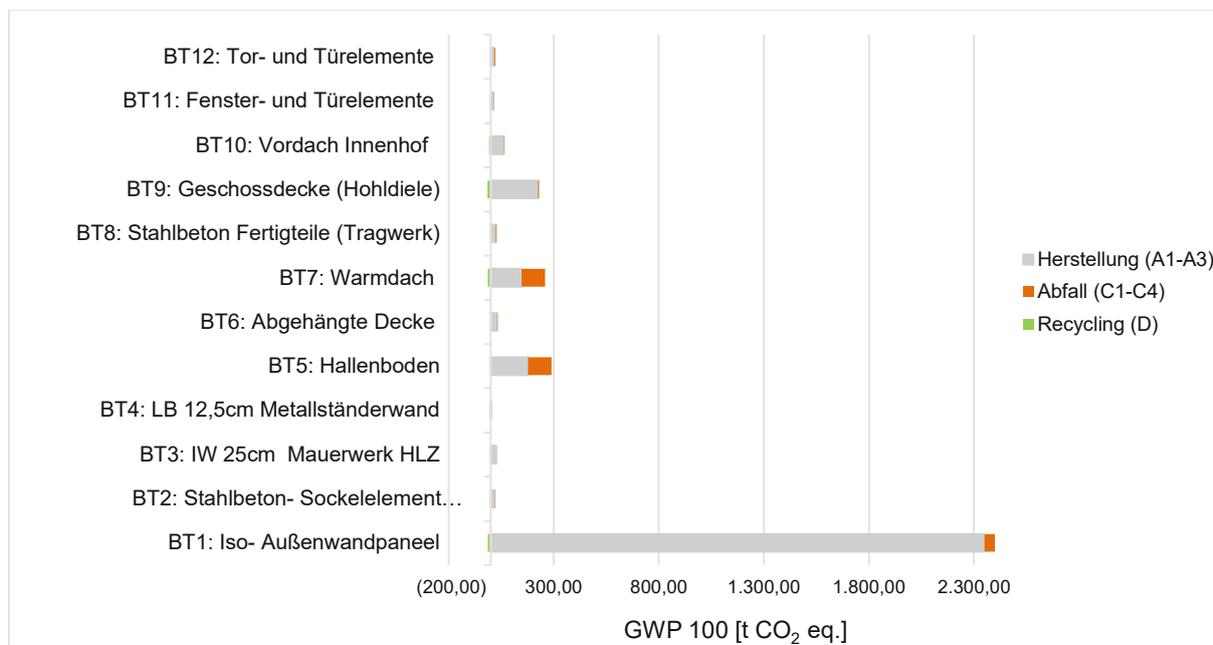


Abbildung 5.6: GWP der vertikalen Erweiterung auf Bauteilebene - End of Life: Variante A

**Abbildung 16** verdeutlicht nochmals, dass die Außenfassade auch über den Lebenszyklus das maßgebende Bauteil hinsichtlich des Treibhauspotenzials bleibt. Dies liegt sowohl an der Materialzusammensetzung als auch an der kurzen Lebensdauer von etwa *35 Jahren*, wohingegen die Lebensdauer der massiven Stahlbetonelemente bei etwa *100 Jahren* liegt. Über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg trägt die Außenfassade mit **72 %** der gesamten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wesentlich zu den Umweltauswirkungen des Gebäudes bei.

## 5.2 Variante B: ebener Neubau

Für die Variante B wurde ein Produktionslayout für eine eingeschossige Halle mit Büro- und Produktionsbereich entwickelt. Das entwickelte Gebäudekonzept orientiert sich an den Achsrastern des Bestandsgebäudes. Um eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Gebäudekonzepte sicherzustellen, wurden die gleichen Bauteilaufbauten wie bei der Variante A gewählt. Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen der Konzeptentwicklung durchgeführten Analysen näher erläutert.

### 5.2.1 Variante B: Tragsystem

Das Tragwerk der Variante B wurde ebenfalls als Stahlbeton-Skelettbau mit eingespannten Kragstützen ausgeführt (**siehe Abbildung 17**).

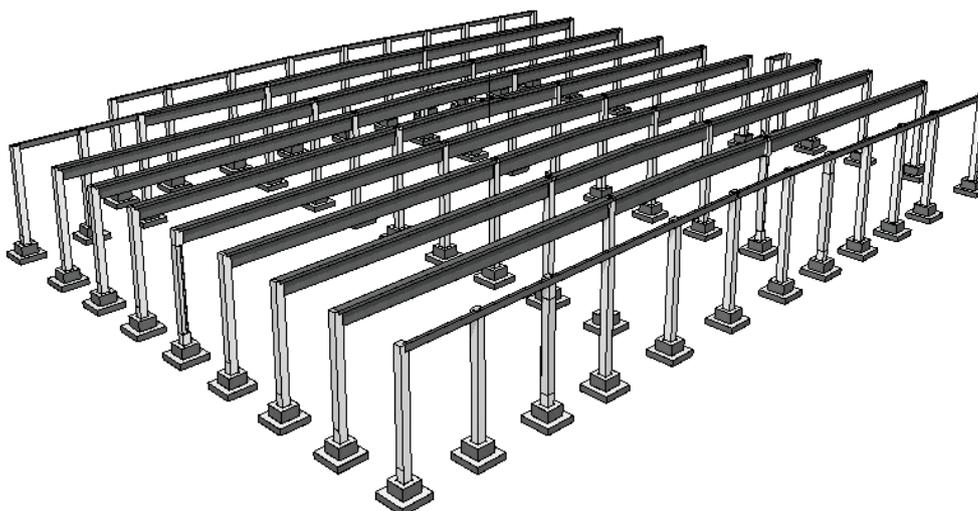
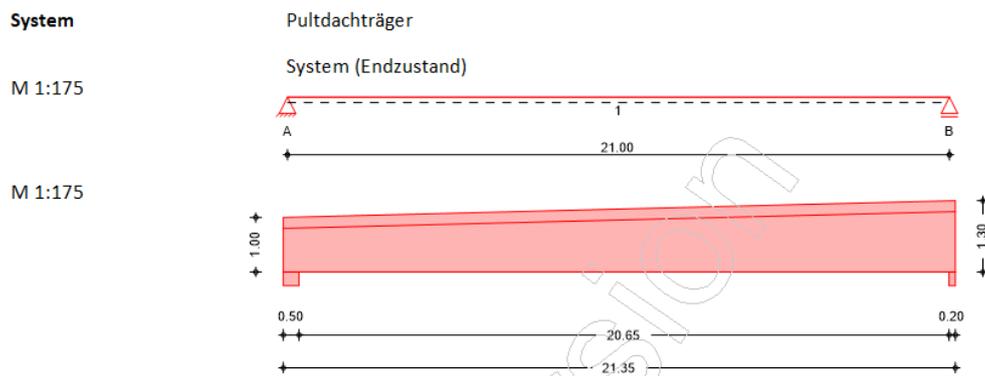
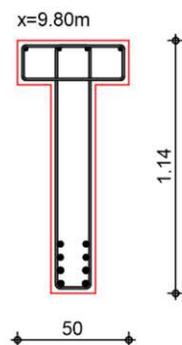
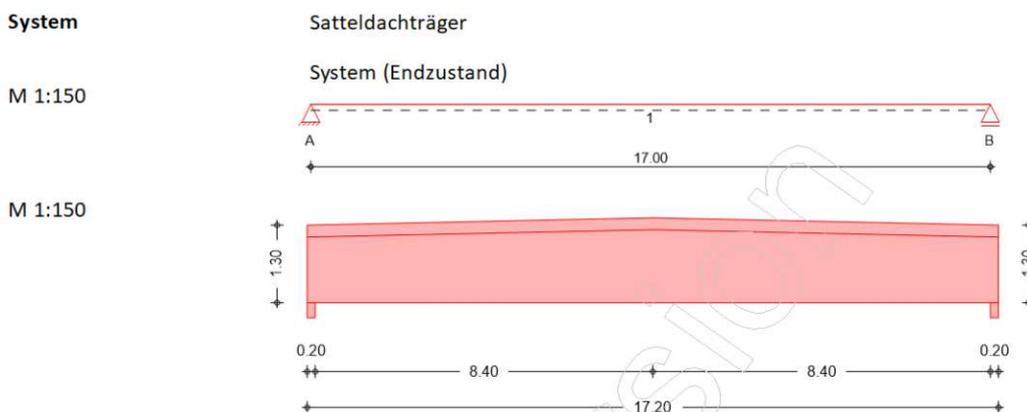


Abbildung 5.7: Darstellung des Tragwerksystems der Variante B [46]

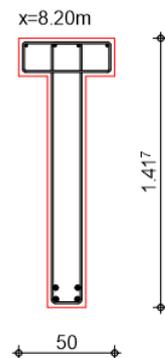
Das Tragwerkskonzept orientiert sich an dem des Bestandsgebäudes und wurde auf eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Innenraumnutzung ausgelegt. Um unterschiedliche Nutzungsszenarien zu ermöglichen, wurden Spannweiten von bis zu  $21\text{ m}$  gewählt. Ziel der statischen Vorbemessung war es, Träger und Stützen so zu dimensionieren, dass auch eine spätere vertikale Erweiterung des Gebäudes realisiert werden kann. Hierzu wurden entsprechende Lastreserven berücksichtigt, um eine nachhaltige und flexible Tragstruktur zu gewährleisten. Die gewählten Querschnitte sowie die Bewehrungsgrade wurden gemäß **Tabelle 20** ermittelt.

**Stb.- Pultdachbinder L= 21,00 m:****Querschnittswerte:**

Material:	C 45/55
oben:	4Ø16
unten:	4Ø28
	4Ø25
$A_{s,o}$ :	8.0 cm <sup>2</sup>
$A_{s,u}$ :	44,3 cm <sup>2</sup>
Bügel:	Ø10/30.0
Schnittig:	2

**Stb.- Satteldachbinder L= 17,00 m:****Querschnittswerte**

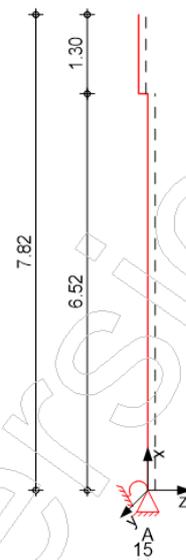
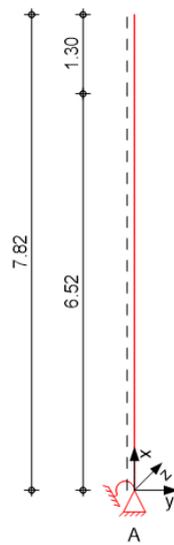
Material:	C 35/45
oben:	4Ø16
unten:	4Ø28
$A_{s,o}$ :	8.0 cm <sup>2</sup>
$A_{s,u}$ :	24,6 cm <sup>2</sup>
Bügel:	Ø10/30.0
Schnittig:	2



## Stb. - Kragstütze 50x50 cm

System  
M 1:120

allgemeines System



### Querschnittswerte

Material: C 35/45  
Längsstäbe 8Ø20  
Querkraftbewehrung: Ø10/20.0  
 $A_{s,ges.}$ : 25,13 cm<sup>2</sup>  
 $A_{sw}$ : 7.85 cm<sup>2</sup>

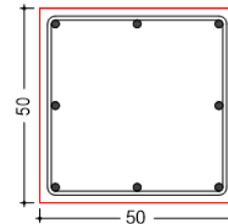


Tabelle 5.2: Querschnittswerte des Tragwerks: Variante B

Aufgrund der großen Spannweiten von bis zu 21 m ist die maximale Durchbiegung der Dachbinder im GZG maßgebend für die Tragwerksreserven des Gebäudes. **Tabelle 9** zeigt die relevanten Bauteile sowie deren Auslastung gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [48], differenziert für den GZG sowie der Tragfähigkeit GZT.

Träger	Tragwerksnachweise gemäß EN 1992-1-1:2011-01		
	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)		Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)
	Spannungsnachweis $\eta$ [-]	Verformungsnachweis $\eta$ [-]	Druckstrebe $\eta$ [-]
Stb.- Pultdachbinder L= 21,00 m	0,56	0,94	0,22
Stb.- Satteldachbinder L= 17,00 m	0,40	0,52	0,16
Stützen	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)		
	Bruchschnittgrößen $\eta$ [-]		
Stb. - Kragstütze 50x50 cm	0,15		

Tabelle 5.3: Tragwerksnachweise der Variante B gemäß EN 1992-1-1 2020 [47]

Da der Verformungsnachweis des Pultdachbinders mit  $\eta = 0,94$  nahezu vollständig ausgelastet ist, wurde für den Neubau eine zulässige Überhöhung der Dachbinder von bis zu 7 cm vorgesehen. Das Ziel war es, trotz der hohen Spannweiten eine möglichst geringe Auslastung der Dachbinder zu erzielen und so strukturelle Reserven für spätere Erweiterungen zu ermöglichen.

Das maximale Achsraster des Gebäudes wurde mit 5 x 21 m gewählt. Dieses orientiert sich an der sekundären Tragkonstruktion der Dachhaut, welche durch Trapezbleche ausgeführt wird. Durch die Wahl der Binderabstände werden die maximalen Spannweiten der Dachhaut eingehalten und gleichzeitig flexible Deckensysteme, im Hinblick auf zukünftige Umnutzungen und Erweiterungen ermöglicht.

### 5.2.2 Variante B: Gebäudekennwerte

Im Rahmen des Konzeptes der Variante B wurde das bestehende Gebäude vollständig rückgebaut und auf dem vorhandenen Grundstück ein Neubau der Industriehalle geplant. Die Gebäudeflächen und Volumina der Halle ergeben sich wie folgt:

<u>Brutto- Geschossfläche (BGF):</u>	2.771,41 m <sup>2</sup>
<u>Brutto-Rauminhalt (BRI):</u>	22.837,36 m <sup>3</sup>
<u>Nettogrundfläche a (NGFa):</u>	2.685,81 m <sup>2</sup>

Zur Quantifizierung der bei der Errichtung entstehenden Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmassen wurden die im Rahmen der Bestandsanalyse ermittelten Rückbaumassen berücksichtigt. Im Gegensatz zur Variante A werden jedoch keine Bauteile oder Materialien des Bestandsgebäudes wiederverwendet. Somit wurden die rückgebauten Materialien ausschließlich als Abfall- und Recyclingmassen klassifiziert und entsprechend mit einbezogen. **Abbildung 18** stellt die im Zuge der Errichtung des Gebäudes anfallenden Herstellung-, Abfall- und Recyclingmassen anhand eines Balkendiagramms auf Bauteilebene dar. Dadurch sollen die Einflüsse der jeweiligen Gebäudekomponenten auf den Gesamtressourceneinsatz verdeutlicht werden.

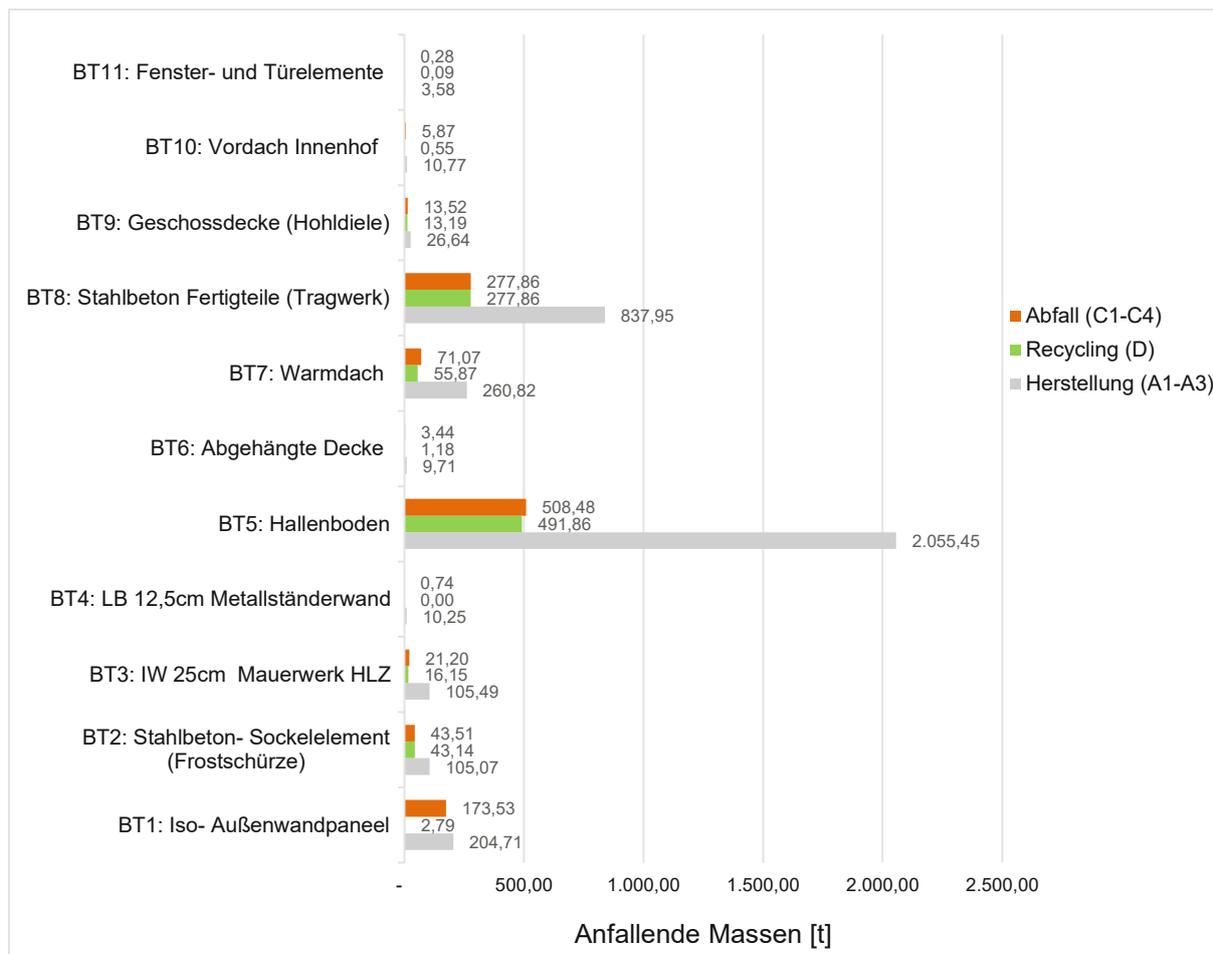


Abbildung 5.8: Anfallende Massen für die Errichtung der Variante B, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling

Wie bereits in Variante A verursachen die massiven Bauteile den Großteil der Errichtungsmassen. Dabei entfallen auf das Stahlbeton-Tragwerk sowie den Hallenboden der Großteil der Gebäudemassen. Aufgrund der zusätzlichen Grundfläche werden allein für die Herstellung des Hallenbodens  $2.055,45 t$  an Material benötigt. Zudem fallen neben der Errichtung weitere  $491,85 t$  an Recyclingmaterialien sowie  $508,48 t$  an nicht wiederverwendbarem Abfall an.

Die Gesamtmassen für die Umsetzung des Neubaus gliedern sich wie folgt:

$3.630,43 t$  Herstellungsmassen

$902,62 t$  Recyclingmassen

$1.119,50 t$  Abfallmassen

**Abbildung 19** zeigt den Einfluss der Lebensdauer des Gebäudes auf die Entwicklung der Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmassen für die einzelnen Gebäudekomponenten.

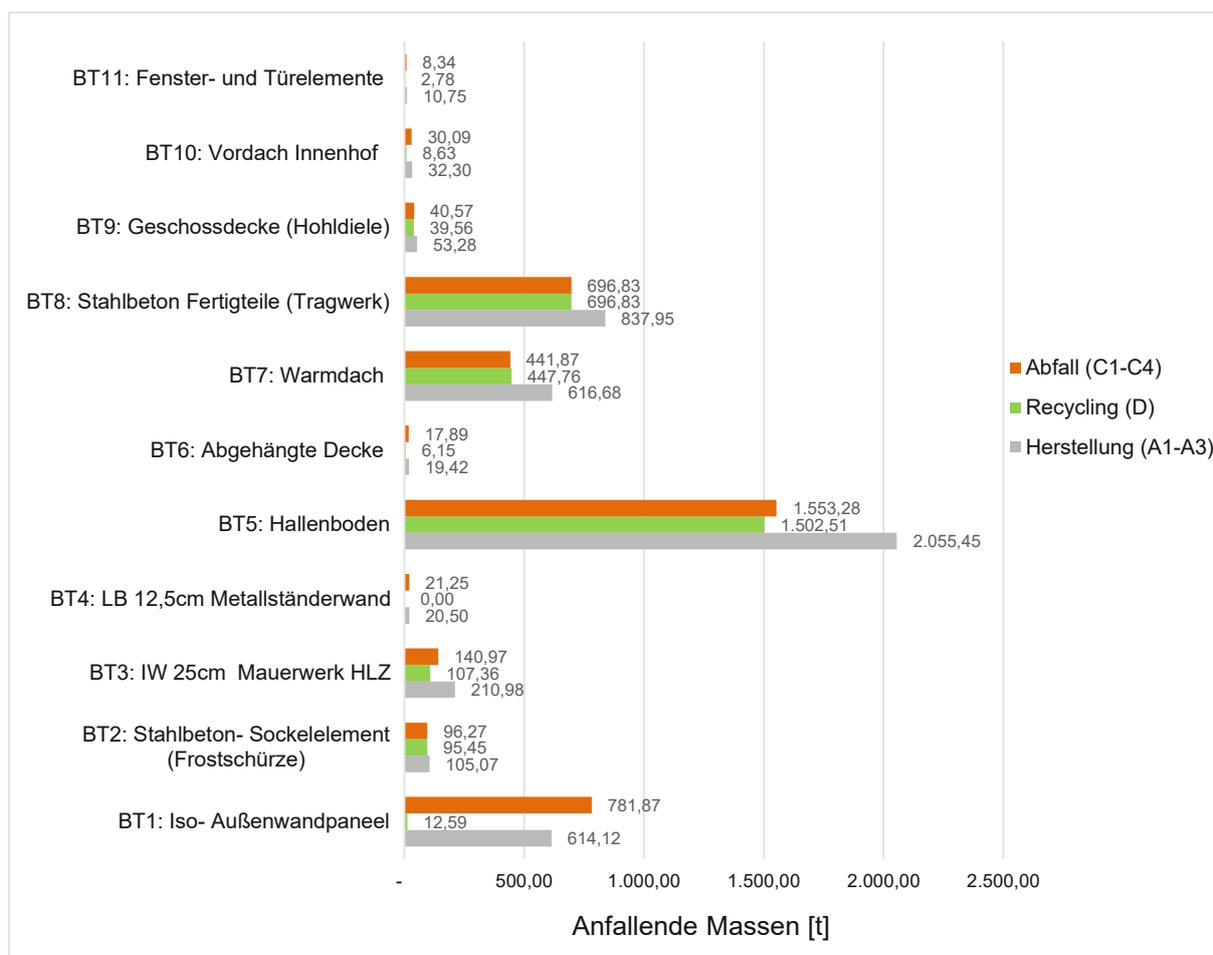


Abbildung 5.9: Anfallende Massen am Ende des Lebenszyklus der Variante B, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling

Die Darstellung verdeutlicht, dass - analog zur Variante A - insbesondere die Außenhülle bestehend aus Warmdach (BT 7) und der Außenfassade (BT 1), aufgrund der Sanierungszyklen einen deutlichen Anstieg der Gesamtmassen über die Lebensdauer aufweist. Für die massiven Bauteile wie das Stahlbeton-Tragwerk (BT 8) und den Hallenboden (BT 5) bleibt die Herstellungsmasse über die Lebensdauer konstant, da diese üblicherweise nicht ersetzt werden müssen. Allerdings zeigt sich, dass die Abfall- und Recyclingmassen auch hier am Ende der Lebensdauer des Gebäudes signifikant zunehmen.

### 5.2.3 Variante B: Ergebnisse der Ökobilanzierung

Analog zur Auswertung der vertikalen Erweiterung wurden die Umweltauswirkungen des ebenen Neubaus sowohl für die Errichtungsphase als auch für das Ende der Lebensdauer nach 80 Jahren ausgewertet. **Tabelle 10** fasst die Umweltkennwerte für beide Lebenszyklusphasen hinsichtlich des GWP, AP sowie des PERNT zusammen.

	Errichtung			End of Life (80 Jahre)		
	GWP [t CO <sub>2</sub> eq.]	AP [t SO <sub>2</sub> eq.]	PERNT [GJ]	GWP [t CO <sub>2</sub> eq.]	AP [t SO <sub>2</sub> eq.]	PERNT [GJ]
<b>Herstellung (A1-A3)</b>	1.350,03	12,34	1.5161,90	2.820,20	15,95	33.009,83
<b>Abfall (C1-C4)</b>	109,51	0,10	387,53	463,74	0,29	1.479,10
<b>Recycling (D)</b>	- 23,34	- 0,21	1,63	- 64,39	- 0,41	150,86
<b>Gesamt</b>	<b>1.436,20</b>	<b>12,83</b>	<b>15.551,05</b>	<b>3.219,55</b>	<b>15,83</b>	<b>34.639,89</b>

Tabelle 5.4: GWP, AP und PERNT des ebenen Neubaus für die Errichtung sowie am Ende der Lebensdauer : Variante B [26]

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Errichtung des Neubaus gegenüber der vertikalen Erweiterung mit einem etwa 34 % höheren Treibhauspotenzial verbunden ist. Auch das Versauerungspotenzial (AP) sowie der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PERNT) fallen deutlich höher aus. Dies lässt sich insbesondere auf den vollständigen Rückbau zusammen mit dem Neubau des Gebäudes zurückführen, wohingegen die Bestandsstruktur bei Variante A zum Großteil erhalten bleibt.

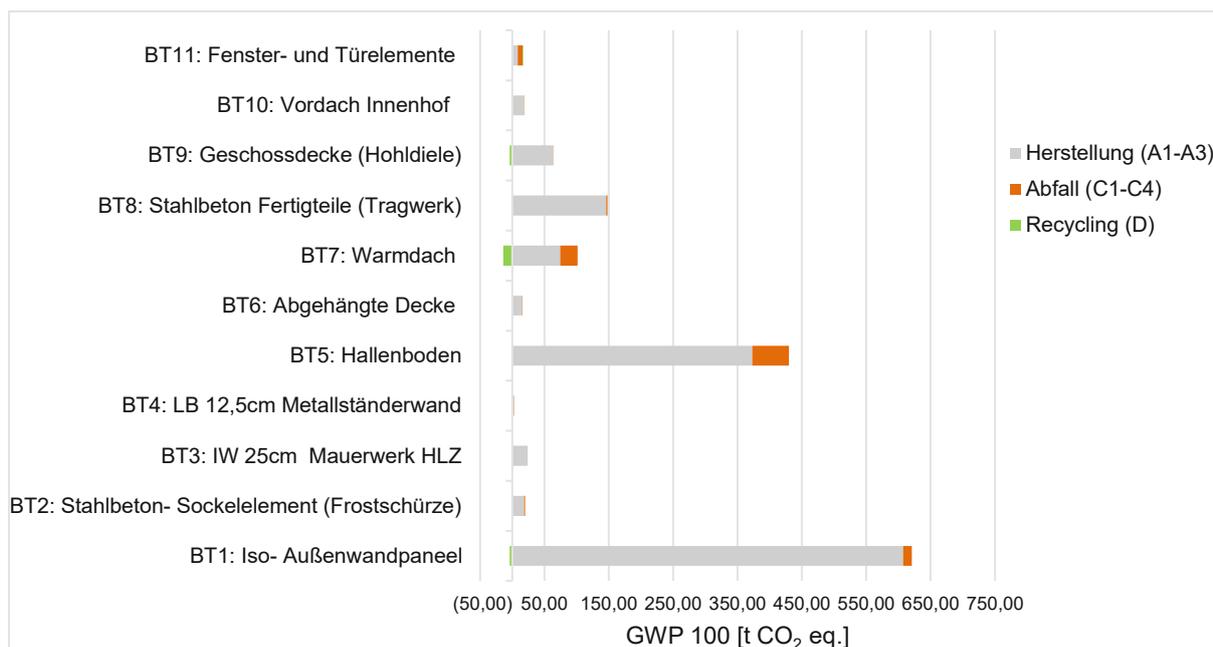


Abbildung 5.10: GWP für den ebenen Neubau auf Bauteilebene: Variante B

**Abbildung 20** zeigt das Treibhauspotenzial (GWP) zum Errichtungszeitpunkt auf Bauteilebene. Vor allem die Beiträge der Hallensohle (BT 5) mit insgesamt  $428,47 \text{ t CO}_2\text{-eq}$  sowie die Außenfassade (BT 1) mit  $616,76 \text{ t CO}_2\text{-eq}$  haben zusammen einen erheblichen Anteil und sind somit maßgeblich für die höheren Gesamtemissionen gegenüber der Variante A verantwortlich. **Abbildung 21** zeigt die kumulierten Treibhauspotenziale am Ende des Lebenszyklus.

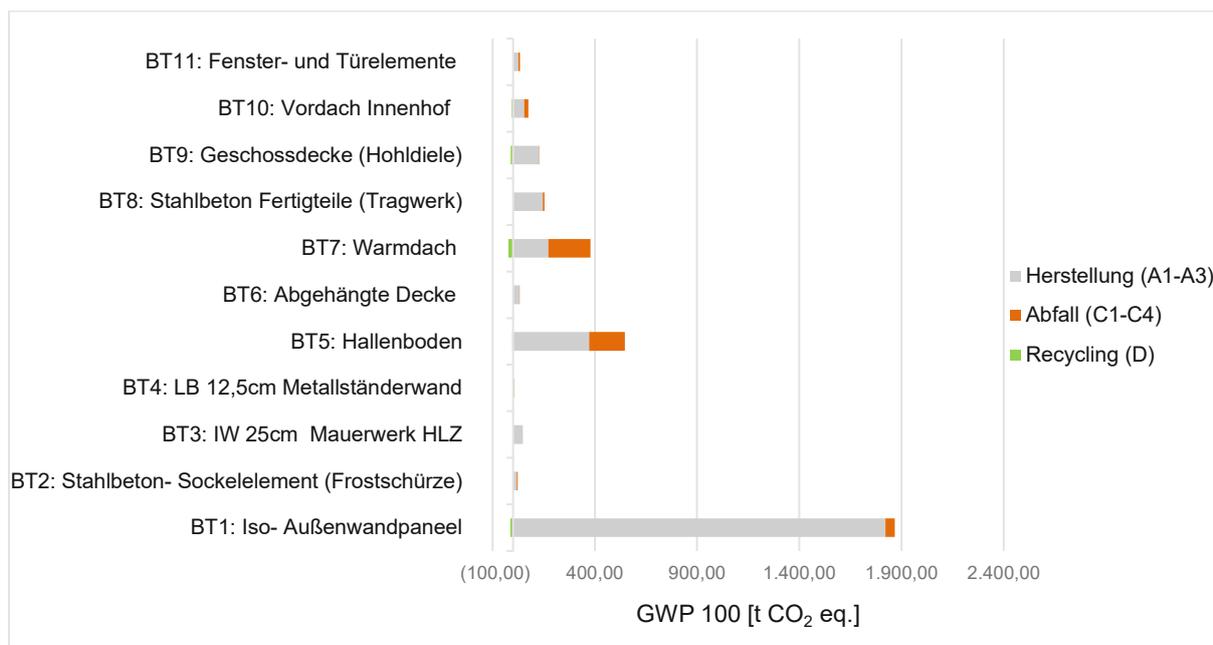


Abbildung 5.11: GWP der vertikalen Erweiterung auf Bauteilebene - End of Life: Variante B

Analog zur vertikalen Erweiterung wird auch hier die Außenfassade (BT 1) mit  $1.853,47 \text{ t CO}_2\text{-eq}$  maßgebend für die Treibhauspotenziale, was ebenfalls auf die Kombination der energieintensiven Materialien sowie der geringen Lebensdauer zurückzuführen ist. Beim Warmdach (BT 5) zeigt sich zudem, dass aufgrund der Abdichtungs- und Dämmstoffe die Emissionen im Zusammenhang mit der Entsorgung der Materialien, die der Materialherstellung sogar um etwa 7 % überschreiten.

Die durchgeführten Lebenszyklusanalysen beider Varianten verdeutlichen, dass die Außenfassade, die Hallensohle, die Geschossdecke und die Tragstruktur des Gebäudes die größten Treibhauspotenziale aufweisen.

## 5.3 Vergleich der Ergebnisse

Um die ermittelten Gebäudedaten der Variante A (vertikale Erweiterung) und B (ebener Neubau) zu beurteilen, werden die Ergebnisse der Analysen hinsichtlich der Ressourcennutzung sowie der daraus resultierenden Umweltauswirkungen gegenübergestellt. Zudem werden im Anschluss beide Varianten anhand der Vertical Reuse Indicators (VRIs) miteinander verglichen und bewertet.

### 5.3.1 Vergleich der Gebäudemassen

Zur Gegenüberstellung der Ressourcennutzung wurden in den **Abbildungen 22 bis 24** die Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmassen der Variante A (vertikale Erweiterung) und Variante B (ebener Neubau) über den Lebenszyklus hinweg analysiert und miteinander verglichen.

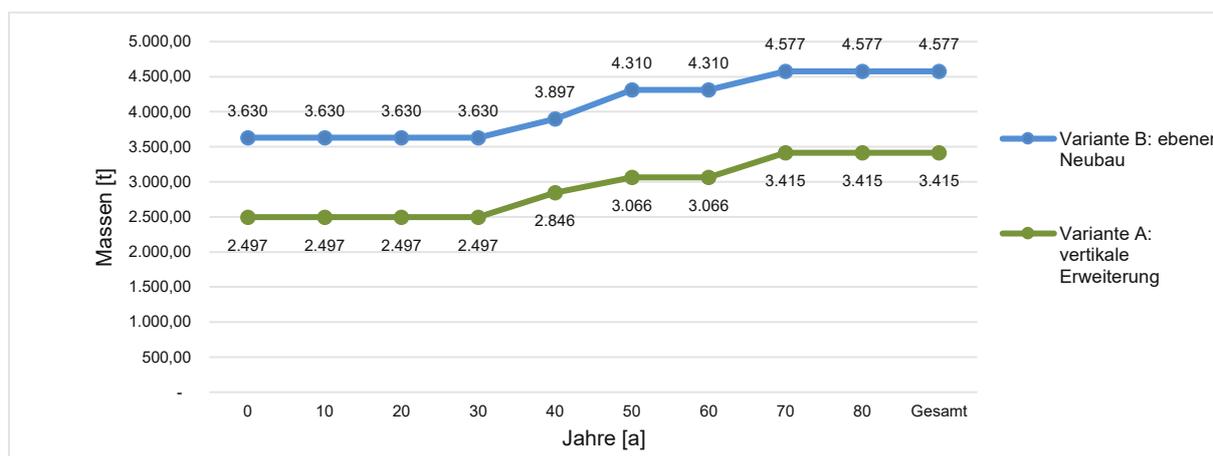


Abbildung 5.12: Vergleich der Herstellungsmassen der Variante A und B über den Lebenszyklus

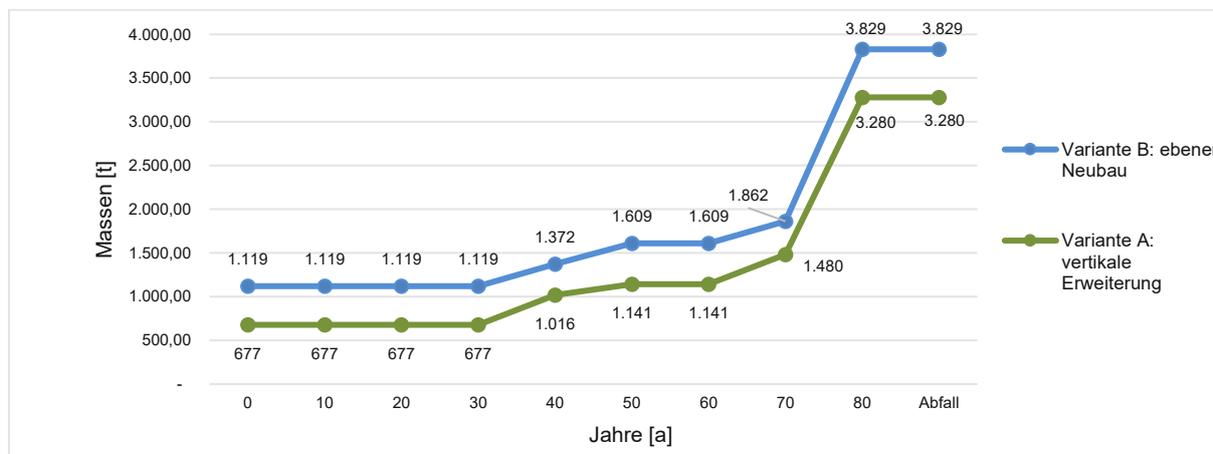


Abbildung 5.13: Vergleich der Abfallmassen der Variante A und B über den Lebenszyklus

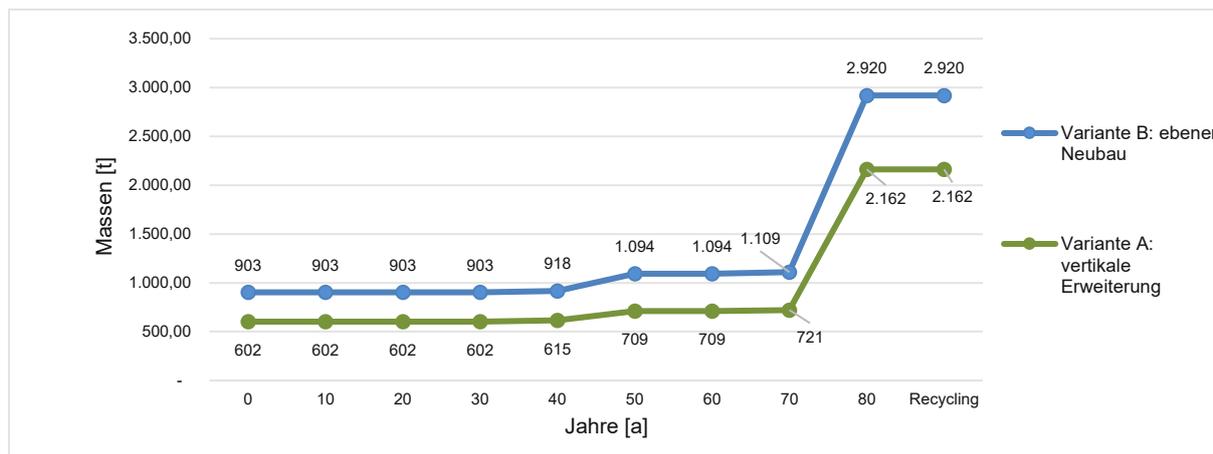


Abbildung 5.14: Vergleich der Recyclingmassen der Variante A und B über den Lebenszyklus

Der direkte Vergleich über den Lebenszyklus zeigt, dass der Großteil der Gebäudemassen sowohl in der Errichtungs- als auch in der Abbruchphase anfällt. In **Abbildung 22** wird der Einfluss der Bestandserhaltung deutlich, da bei der vertikalen Erweiterung (Variante A) rund  $1.133,71 t$  weniger Herstellungsmassen gegenüber der Variante B benötigt werden. Dies unterstreicht das Ressourceneinsparpotential durch den Erhalt des Bestandsgebäudes.

Die **Abbildungen 23** und **24** verdeutlichen zudem, dass Variante B deutlich höhere Abfall- und Recyclingmassen gegenüber der Variante A verursacht. Aufgrund der ähnlichen Bauweise und identischen Bauteilaufbauten entstehen bei den Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmassen jedoch keine signifikanten Unterschiede über den Lebenszyklus. Daraus lässt sich ableiten, dass insbesondere die Herstellungsphase des Gebäudes eine zentrale Rolle spielt, da bei vergleichbarer Bauweise die ressourcenschonende Errichtung maßgebend für die anfallenden Herstellungs-, Abfall- und Recyclingmassen über den Lebenszyklus ist.

### 5.3.2 Vergleich der Ökobilanzierung

Zur vergleichenden Bewertung der ökologischen Auswirkungen zeigen die **Abbildung 26** und **Abbildung 27** die Ergebnisse der Ökobilanzierung hinsichtlich der Treibhauspotenziale (GWP), sowohl für die Errichtung als auch am Ende der Lebensdauer. Für eine fundierte Vergleichsanalyse wurden die Treibhauspotenziale beider Varianten auf die Nettogrundflächen (NGFa) der Gebäude bezogen.

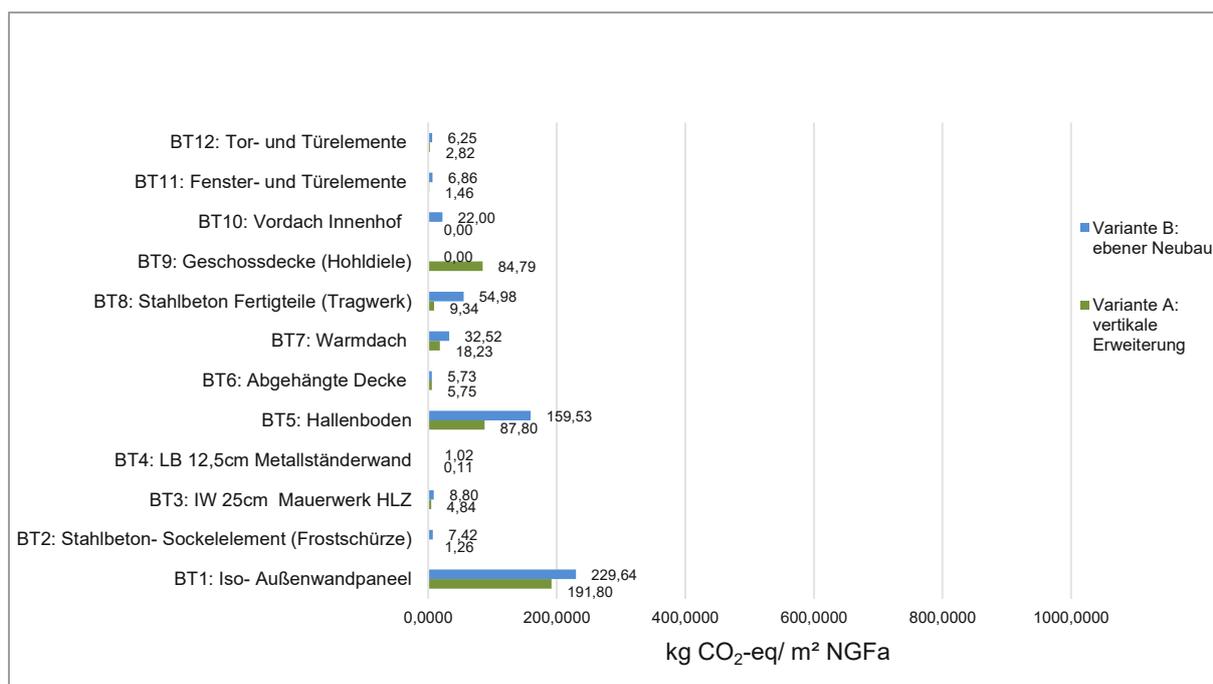


Abbildung 5.15: Vergleich des GWP im Zuge der Errichtung (t=0) für Variante A und B

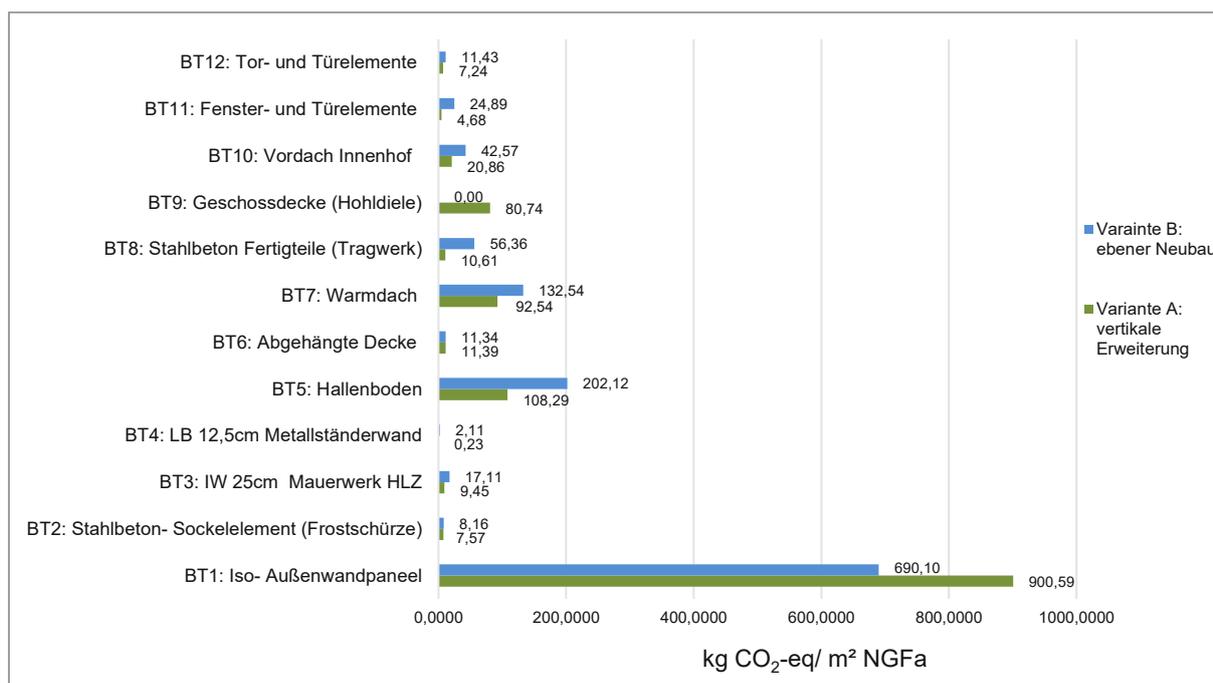


Abbildung 5.16: Vergleich des GWP am Ende der Lebensdauer (t= 80 Jahre) für Variante A und B

Die detaillierte Analyse auf Bauteilebene zeigt, dass bei beiden Varianten die Außenfassade (BT 1) über den gesamten Lebenszyklus hinweg den größten Anteil zum Treibhauspotenzial leistet. Der direkte Vergleich verdeutlicht, dass die Außenfassade aufgrund der geringen Lebensdauer sowie der Materialzusammensetzung einen überproportional hohen Beitrag zum gesamten GWP leistet.

Trotz der ressourcenschonenderen Errichtung der Variante A wird dies durch die größere Fassadenfläche langfristig relativiert. Am Ende des Lebenszyklus entstehend somit bei der Variante A mit  $1.254,21 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^2 \text{ NGFa}$  sogar leicht höhere Treibhauspotenziale als bei Variante B mit  $1.198,72 \text{ kg CO}_2\text{-eq/m}^2 \text{ NGFa}$ .

Die Ergebnisse der Vergleichsanalyse verdeutlichen, dass nicht nur die Errichtungsphase, sondern insbesondere die Materialwahl und die Lebensdauer der verwendeten Bauteile entscheidend für eine ökologische Bewertung eines Gebäudes sind.

### 5.3.3 Vertical Reuse Indicators

Zur Bewertung beider Varianten hinsichtlich der strukturellen Wiederverwendung, Gesamtflexibilität und Flächenbeanspruchung wurden die Vertical Reuse Indicators (VRIs) [49] verwendet, um eine qualitative Beurteilung der Nutzungsqualität sowie der Flächennutzungskonzepte durchzuführen. Die für die Berechnung erforderlichen Eingangsparameter beider Varianten sind in **Tabelle 11** zusammengefasst.

		Variante A: vertikale Erweiterung	Variante B: ebener Neubau
Volumen der erhaltenen Tragstruktur	$B_{sa} [m^3]:$	206,07	-
Volumen der ursprünglich bestehenden Tragstruktur	$B_{se} [m^3]:$	228,97	228,97
Tatsächliche Last der vertikalen Erweiterung	$F_{RT} [kN/m^2]:$	10,00	-
Maximale Traglastreserve der bestehenden Struktur	$F_{RT} [kN/m^2]:$	10,00	10,00
Unversiegelte Fläche des Grundstücks	$A_U [m^2]:$	6.750,96	5.345,95
Gesamtfläche des Grundstücks	$A_P [m^2]:$	8.117,36	8.117,36
Optimale Rasterfläche für industrielle Nutzung	$A_{opt} [m^2]:$	625,00	625,00
Tatsächliche Rasterfläche	$A_{act} [m^2]:$	50,00	105,00
Grundfläche einer Stütze	$A_c [m^2]:$	0,25	0,25
Nutzbare Nettofläche ohne Hindernisse	$A_{net} [m^2]:$	1.321,41	2.685,81
Anzahl der Stützen die das Layout einschränken	$N_c [Stck]:$	12	16,00
<b>Strukturerhalt (Structural Preservation):</b>		<b>SP</b>	
$SP = \frac{B_{S_a}}{B_{S_e}} \times 100 [\%]$		<b>90,00</b>	-
<b>Vertikale Erweiterung (Vertical Extension):</b>		<b>VE</b>	
$VE = \frac{F_{RT}}{F_{RT,max}} \times 100 [\%]$		<b>100,00</b>	-
<b>Unversiegelte Fläche (Unsealed Area):</b>		<b>UA</b>	
$UA = \frac{A_U}{A_P} \times 100 [\%]$		<b>83,17</b>	<b>65,86</b>
<b>Layout-Flexibilität (Layout Flexibility):</b>		<b>LF</b>	
$LF = \left(1 - \frac{ A_{opt} - A_{act} }{A_{opt}}\right) \times \left(1 - \frac{N_c \cdot A_c}{A_{net}}\right) \times 100 [\%]$		<b>7,98</b>	<b>16,77</b>

Tabelle 5.5: Berechnung der Vertical Reuse Indicators der Varianten A und B [49]

Der *SP-Indikator* quantifiziert den Anteil der erhaltenen Tragstruktur des Bestandsgebäudes. Die vertikale Erweiterung erzielt hier aufgrund des nahezu vollständigen Erhalts der Bestandsstruktur, mit 90 % einen sehr hohen Wert. Bei der

Variante B hingegen werden aufgrund des vollständigen Rückbaus 0 % der Bestandsstruktur erhalten.

Der *VE-Indikator* wird bei der Variante A mit 100 % vollständig erfüllt, da die vorhandene Tragstruktur im Zuge der vertikalen Erweiterung maximal ausgelastet wird, um die Anforderungen der Produktionsprozesse erfüllen zu können. Aufgrund des Neubaus entfällt dieser Wert für Variante B ebenfalls.

Der *UA-Indikator* zeigt auch deutliche Unterschiede hinsichtlich der Flächenversiegelung beider Varianten. Die Variante A weist mit einer Flächenversiegelung des Grundstücks von 16,83 % einen erheblich geringeren Anteil gegenüber der Variante B mit 34,14 % auf. Demnach bietet die vertikale Erweiterung des Gebäudes auch hinsichtlich der Bodenversiegelung die ressourcenschonendere Variante.

Die Gestaltungsfreiheit beider Gebäude wurde anhand des *LF-Indicators* beurteilt. Die optimale Rasterfläche  $A_{opt}$  wurde basierend auf den maximalen Spannweiten für Stahlbetonbinder mit  $25 \times 25 \text{ m}$  gewählt, um die Layoutflexibilität beider Gebäude zu beurteilen. Die Variante B erzielt hierbei mit 16,77 % den höheren Wert gegenüber der Variante A mit 7,98 %. Die Einschränkungen der Layoutflexibilität sind dabei auf die zusätzlich notwendige Stützenreihe im Zuge der vertikalen Erweiterung zurückzuführen und sorgen somit für eine zusätzliche Einschränkung flexibler Nutzungskonzepte.

Zur Verdeutlichung der Indikatoren sind in **Abbildung 28** die Ergebnisse der VRIs für beide Gebäude anhand eines Netzdiagramms dargestellt.

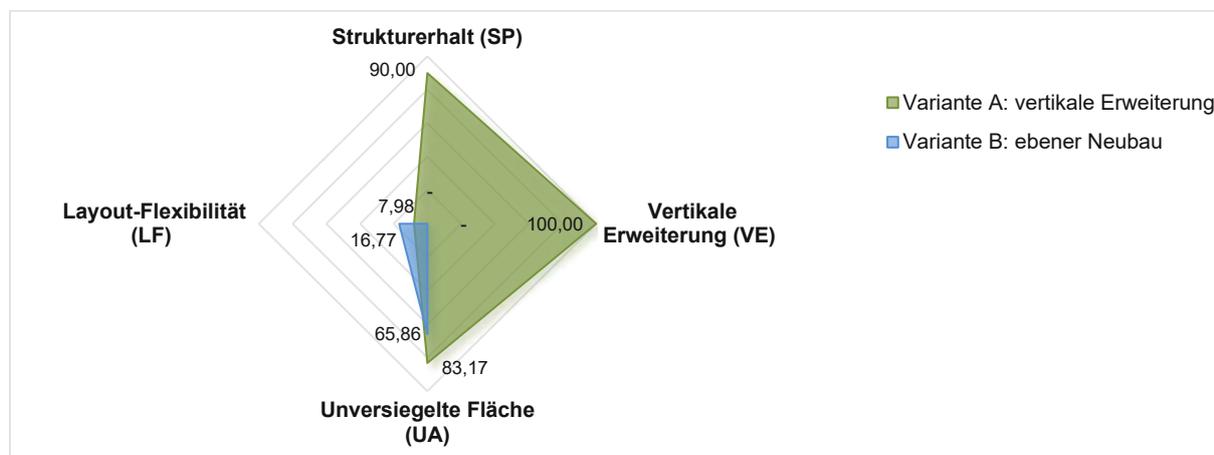


Abbildung 5.17: Auswertung der VRIs zur Bewertung der Gebäudekonzepte A und B

Die Ergebnisse der VRIs ergeben, dass die vertikale Erweiterung die ökologischere und ressourcenschonendere Variante gegenüber dem Neubau bietet. Insbesondere der Erhalt der Tragstruktur und die geringe Flächenversiegelung sind hinsichtlich der VRIs ausschlaggebend. Die Variante B kann hingegen aufgrund der flexiblen Gestaltung des Neubaus durch eine höhere Layoutflexibilität überzeugen, was wiederum für zukünftige Nutzungsanpassungen von Vorteil sein kann.

### 5.3.4 Gesamtergebnisse

Die Gesamtergebnisse der Vergleichsstudie sind in **Tabelle 12** dargestellt:

Kriterium	Einheit	Variante A	Variante B	Delta (A - B)	Veränderung B vs. A
Herstellungsmassen	t	3.414,92	4.576,50	-1.161,58	↑ 34,0 %
Abfallmassen	t	3.279,51	3.829,23	-549,72	↑ 16,8 %
Recyclingmassen	t	2.162,19	2.919,61	-757,42	↑ 35,0 %
GWP(100)	[kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> NGF]	1.254,21	1.198,72	55,49	↓ 4,4 %
AP	[kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> NGF]	5,94	5,89	0,05	↓ 0,8 %
PERNT	[MJ/m <sup>2</sup> NGF]	13.627,61	12.897,37	730,24	↓ 5,4 %
Strukturerhalt (Structural Preservation):	%	90,00	-	-	-
Vertikale Erweiterung (Vertical Extension):	%	100,00	-	-	-
Unversiegelte Fläche (Unsealed Area):	%	83,17	65,86	17,31	↓ 20,8 %
Layout-Flexibilität (Layout Flexibility):	%	7,98	16,77	-8,79	↑ 110,2 %

Tabelle 5.6: Gesamtergebnisse der Vergleichsstudie zwischen Variante A und B

Die Vergleichsanalyse der Varianten A und B zeigt, dass beide Ansätze je nach Bewertungskriterium spezifische Vor- und Nachteile mit sich bringen. Variante A bietet durch den Erhalt der Tragstruktur und die damit verbundenen Einsparungen der Abfall- und Recyclingmassen die ressourcenschonendere Variante. Jedoch führen die größere Fläche der Außenfassade und die geringe Lebensdauer zu langfristig hohen Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus. Die anfänglichen Einsparungen des GWP, AP und des PERNT werden dadurch langfristig relativiert und führen sogar zu geringfügigen Überschreitungen gegenüber der Variante B.

Die Variante B hingegen ermöglicht eine höhere Layout-Flexibilität durch geringere Einschränkungen der Produktionsflächen. Dies bietet zwar Vorteile für die Umsetzung individueller Nutzungskonzepte, allerdings geht die größere Grundfläche des Gebäudes auch mit einer zusätzlichen Flächenversiegelung des Grundstücks einher. Die Ergebnisse aus der Gegenüberstellung beider Varianten unterstreichen die Bedeutung einer integrativen Bewertung, um fundierte Entscheidungen hinsichtlich eines nachhaltigen Gebäudekonzeptes zu treffen.

## 6 Schlussfolgerung / Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die Potenziale bestehender Tragstrukturen im Industriebau anhand zweier unterschiedlicher Gebäudekonzepte analysiert. Das Ziel war es, die Möglichkeiten einer vertikalen Bestandserweiterung im Vergleich zu einem ebenen Neubau bei identischer Bauweise zu untersuchen. Beide Konzepte wurden unter Berücksichtigung ökologischer, struktureller und funktionaler Gesichtspunkte hinsichtlich der Ökobilanz, Flächenversiegelung und Flexibilität bewertet.

Basierend auf digitalen Gebäudemodellen, maßgebender Tragwerksanalysen sowie umfassender ökologischer Untersuchungen auf Gebäude- und Materialebene konnten die signifikanten Unterschiede zwischen beiden Ansätzen aufgezeigt werden. Ein zentrales Ergebnis ist, dass der Erhalt bestehender Tragwerke, trotz erforderlicher Ertüchtigungsmaßnahmen, erhebliche Einsparpotenziale im Hinblick auf den Materialverbrauch und die Umweltbelastung bietet. Neben der Reduktion von Umwelteinflüssen wie dem GWP, AP und PERNT wird durch den Erhalt bestehender Tragstrukturen auch das Abfallaufkommen erheblich verringert.

Die durchgeführten Lebenszyklusanalysen unterstreichen die Bedeutung der Materialauswahl für die ökologische Gesamtbilanz eines Gebäudes. Insbesondere anhand der Außenfassade zeigt sich, wie stark sich Materialtyp und Aufbau auf die Umweltauswirkungen auswirken. Die gezielte Auswahl nachhaltiger Materialien, sowohl für die Tragstruktur als auch die Gebäudehülle, ist daher ein wesentlicher Faktor für die Errichtung zukunftsfähiger Industriebauten.

Ergänzend wurden mithilfe der Vertical Reuse Indicators die wirtschaftlichen und funktionalen Aspekte der Gebäude betrachtet. Diese zeigen, dass die vertikale Aufstockung zwar gewisse Einschränkungen bei der Layoutflexibilität mit sich bringt, die Produktionsprozesse jedoch nicht wesentlich beeinträchtigen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Bestandsanalyse. Da die Tragwerksnachweise auf der Basis vorhandener Architekturpläne erstellt wurden, ist eine detaillierte Untersuchung der bestehenden Struktur erforderlich, um die tatsächlichen Tragwerksreserven des Gebäudes zuverlässig bestimmen zu können und so die getroffenen Annahmen zu bestätigen. Hierbei können beispielsweise In-situ-Untersuchungen des Tragwerks sinnvoll ergänzt werden, um verlässliche Annahmen zu Bewehrungsgraden und Betondeckungen treffen zu können. Ebenso ist

eine genaue Analyse der Anschlussdetails notwendig, um die technische Machbarkeit der vertikalen Erweiterung vollständig bewerten zu können.

Im Zuge weiterführender Untersuchungen sollten die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen hinsichtlich wirtschaftlicher Faktoren ergänzt werden. Die Ergänzung der ökologischen und funktionalen Einflussfaktoren hinsichtlich einer differenzierten Kostenanalyse kann dazu beitragen Handlungsempfehlungen zur Umsetzung konkreter Sanierungskonzepte für Unternehmen zu entwickeln. Neben den reinen Errichtungskosten sind dabei insbesondere potenzielle Eingriffe in die bestehende Gebäudestruktur sowie deren Auswirkungen auf laufende Produktions- und Industrieprozesse näher zu betrachten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass vertikale Bestandserweiterungen im Industriebau, insbesondere unter dem Aspekt der Flächenversiegelung, eine nachhaltige und ressourcenschonende Alternative zum ebenen Neubau bieten. Die Kombination aus geringerer Flächenversiegelung, der Wiederverwendung des Bestands und der Langlebigkeit der bestehenden Tragstrukturen bietet eine vielversprechende Grundlage zur Entwicklung zukunftsfähiger Gebäudekonzepte. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse im Umgang mit bestehenden Industriegebäuden leisten einen Beitrag zur Weiterentwicklung integrativer Bewertungs- und Analyseprozesse im Industriebau und bieten eine fundierte Basis für weiterführende Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes RE:STOCK INDUSTRY.

## Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt GmbH, „Bodenverbrauch in Österreich – Geringfügiger Rückgang der täglichen Flächeninanspruchnahme im Jahr 2021,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/news221202>. [Zugriff am 12. 11. 2024].
- [2] Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), Internationale Energieagentur (IEA), Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP), „Global Status Report for Buildings and Construction 2019,“ IEA, Paris, 2019.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP), Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), International Energy Agency (IEA), Buildings Performance Institute Europe (BPIE), University College London (UCL), „2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector,“ United Nations Environment Programme (UNEP), 2020.
- [4] Österreichische Raumordnungskonferenz (ÖROK), „Ergebnisse Österreich 2022,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.oerok.gv.at/raum/daten-und-grundlagen/ergebnisse-oesterreich-2022>. [Zugriff am 18. 11. 2024].
- [5] Umweltbundesamt GmbH, „Zwölfter Umweltkontrollbericht,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2019.
- [6] TU Wien – Forschungsbereich Integrale Planung und Industriebau, „RE:STOCK INDUSTRY – Digitaler Framework zur kreislauforientierten Wiederverwendung von Bestandstragwerken für vertikale Produktionen,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.tuwien.at/cee/hib/integral/forschung/forschungsprojekte/restock-industry>. [Zugriff am 15. 06. 2024].
- [7] Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), „Grundlegendokument zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7 – Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen,“ 2023. [Online]. Available: [https://www.oib.or.at/sites/default/files/oib-rl\\_7\\_grundlegendokument\\_ausgabe\\_mai\\_2023.pdf](https://www.oib.or.at/sites/default/files/oib-rl_7_grundlegendokument_ausgabe_mai_2023.pdf). [Zugriff am 18. 01. 2025].
- [8] Europäische Union, „Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der

- Richtlinie 89/106/EWG des Rates,“ 2011. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32011R0305>. [Zugriff am 18. 01. 2025].
- [9] A. Bernhardt, C. Brandstätter, B. Karigl, U. Kral, C. Neubauer und M. Wankmüller-Tista, „Bau- und Abbruchabfälle in Niederösterreich: Aufkommen und Behandlung, Referenzjahr 2021,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2024.
- [10] Europäische Kommission, „Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft – Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa,“ Europäische Kommission, Brüssel, 2020.
- [11] A. Achatz, E. Margelik, T. Romm, T. Kasper und D. Jäger, „KreislaufBAUwirtschaft – Projekt-Endbericht,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2021.
- [12] UNFCCC Secretariat, „The Paris Agreement,“ 2015. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. [Zugriff am 24. 01. 2025].
- [13] Europäische Kommission, „Aktionsplan: Finanzierung nachhaltigen Wachstums,“ Europäische Kommission, Brüssel, 2018.
- [14] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „EU-Taxonomie-Verordnung,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.bmk.gv.at/green-finance/finanzen/eu-strategie/taxonomie/eu-taxonomie-vo.html>. [Zugriff am 25. 01. 2025].
- [15] Rat der Europäischen Union, „European Green Deal,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/>. [Zugriff am 25. 02. 2025].
- [16] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft – Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2022.
- [17] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „naBe-Aktionsplan 2020 – Aktionsplan zur Förderung einer nachhaltigen öffentlichen Beschaffung,“ BMK, Wien, 2020.

- [18] A. Rosen , „Urban Mining Index: Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung,“ Fraunhofer IRB Verlag, Wuppertal, 2020.
- [19] Ellen MacArthur Foundation, „Material Circularity Indicator,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>. [Zugriff am 29. 01. 2025].
- [20] Ellen MacArthur Foundation, „Circulytics – Überblick,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/circulytics/overview>. [Zugriff am 29. 01. 2025].
- [21] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB), „DGNB System für den Gebäuderückbau,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/gebäude/rueckbau>. [Zugriff am 29. 01. 2025].
- [22] TÜV SÜD Industrie Service GmbH, „BREEAM D-A-CH,“ 2025. [Online]. Available: <https://breeam.de/>. [Zugriff am 06. 04. 2025].
- [23] U.S. Green Building Council, „U.S. Green Building Council (USGBC),“ 2025. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/leed>. [Zugriff am 06. 04. 2025].
- [24] Verein Minergie, „Minergie,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.minergie.ch/de/zertifizieren/eco/>. [Zugriff am 06. 04. 2025].
- [25] baubook GmbH, „eco2soft,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.baubook.at/eco2soft/>. [Zugriff am 02 02 2025].
- [26] Deutsches Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), „ÖKOBAUDAT,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.oekobaudat.de>. [Zugriff am 18. 03. 2025].
- [27] Austrian Standards International, „ÖNORM EN 15978:2012-10-01 – Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode,“ Austrian Standards International, Wien, 2012.
- [28] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), „Leitfaden Nachhaltiges Bauen,“ BMWSB, Berlin, 2019.
- [29] Bau EPD GmbH, „Was ist eine EPD?,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.bau-epd.at/epd/was-ist-eine-epd>. [Zugriff am 31. 01. 2025].

- [30] G. Habert, S. Miller, V. John, J. Provis, A. Favier, A. Horvath und K. Scrivener, „Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries,“ *Nature Reviews Earth & Environment*, Bd. 1, Nr. 11, pp. 559-573, 2020.
- [31] J. Giesekam, J. Barrett, P. Taylor und A. Owen, „The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction,“ *Energy and Buildings*, Bd. 78, pp. 202-214, 2014.
- [32] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez und A. Castell, „Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 29, pp. 394-416, 2013.
- [33] H. Dahlbo, J. Bachér, K. Lähtinen, T. Jouttijärvi, P. Suoheimo, T. Mattila, S. Sironen, T. Myllymaa und K. Saramäki, „Construction and demolition waste management e a holistic evaluation of environmental performance,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 107, pp. 333-341, 2015.
- [34] Austrian Standards International, „ÖNORM B 3151:2022-05-15 – Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode,“ Austrian Standards International, Wien, 2022.
- [35] Austrian Standards International, „ÖNORM B 2251:2020-09-01 – Abbrucharbeiten – Werkvertragsnorm,“ Austrian Standards International, Wien, 2020.
- [36] Magistrat der Stadt Wien, MA 37 – Baupolizei, „Beurteilung der technischen Unmöglichkeit von Instandsetzungen,“ Stadt Wien, Wien, 2019.
- [37] Magistratsabteilung 37 – Baupolizei, Stadt Wien, „Merkblatt Wirtschaftliche Abbruchreife,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/wohnen/baupolizei/pdf/merkblatt-abbruchreife.pdf>. [Zugriff am 12. 03. 2025].
- [38] Austrian Standards International, „ÖNORM EN ISO 16000-32:2014-10-01 – Innenraumluft – Teil 32: Untersuchung von Gebäuden auf Schadstoffe (ISO 16000-32:2014),“ Austrian Standards International, Wien, 2014.
- [39] Bundeskanzleramt der Republik Österreich, „Recycling-Baustoffverordnung (RBV), BGBl. II Nr. 231/2015,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212>. [Zugriff am 18. 01. 2025].

- [40] Europäische Kommission, „Waste Framework Directive,“ 2023. [Online]. Available: [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en). [Zugriff am 04. 02. 2025].
- [41] M. Leichter, A. Dodoo und C. Piccardo, „Life cycle assessment of energy renovation versus demolition and new construction in the context of a social housing project,“ *Clean Technologies and Environmental Policy*, Bd. 26, Nr. 2, pp. 381-395, 2024.
- [42] C. Ciacci und F. Bazzocchi, „Retrofitting of the Italian precast industrial building stock: LCA analysis as decision-making tool,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 478, pp. 1-15, 2024.
- [43] M. Abouhamad und M. Abu-Hamd, „Life Cycle Assessment Framework for Embodied Environmental Impacts of Building Construction Systems,“ *Sustainability*, Bd. 13, Nr. 2, pp. 1-21, 2021.
- [44] J. Reisinger, M. A. Zahlbruckner , P. Kan, I. Podkosova, H. Kaufmann und I. Kovacic, „RE:STOCK INDUSTRY: digital framework for the circular reuse of existing structures for vertical production,“ in *2024 European Conference on Computing in Construction (EC3)*, Chania, Kreta, Griechenland , 2024.
- [45] BauNetz Media GmbH, „Baunetz Wissen,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/impressum>. [Zugriff am 15. 04. 2025].
- [46] Graphisoft, „Archicad 27.3.1,“ 2025. [Online]. Available: <https://graphisoft.com/downloads/archicad/updates/archicad-27-3-1/>. [Zugriff am 02 02 2025].
- [47] mb AEC Software GmbH, „mb WorkSuite 2024,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.mbaec.de/mb-worksuite-2024>. [Zugriff am 14 02 2025].
- [48] Austrian Standards International, „ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02-15 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau,“ Austrian Standards International, Wien, 2015.
- [49] M. B. Nömayr und J. Reisinger , „A Vertical Reuse Assessment Model for Industrial Building Stock: Structural and Circular Assessment at Early Design Stage,“ in *2025 European Conference on Computing in Construction*, Porto, Portugal, 2025.

- [50] Amt der NÖ Landesregierung, „Alte NÖ Bauordnung von 1976,“ 1976. [Online]. Available: <https://www.noe.gv.at/noe/Bauen-Neubau/Bauordnung1976.html>. [Zugriff am 09. 01. 2025].
- [51] Anonymisiert, „Ausführungsplanung,“ 2021.
- [52] Anonymisiert, „Energieausweis Bestandsgebäude,“ 2019.
- [53] Austrian Standards International, „ÖNORM B 1991-1-1:2020-12-01 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen,“ Austrian Standards International, Wien, 2020.
- [54] FRANZ OBERNDORFER GmbH & Co KG, „Konstruktive Fertigteile,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.oberndorfer.com/konstruktive-fertigteile>. [Zugriff am 11. 03. 2025].
- [55] DW Systembau, „DW Apps & Tools,“ 2025. [Online]. Available: <https://www.dw-systembau.de/apps-tools.html>. [Zugriff am 20. 03. 2025].

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 2.1: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes in Anlehnung an [27].....</i>	13
<i>Abbildung 2.2: Lebenszyklus eines Gebäudes in Abhängigkeit der Lebenszyklen der Produkte in Anlehnung an [27] .....</i>	15
<i>Abbildung 2.3: Ablauf des Rückbaus eines Gebäudes gemäß ÖNORM B3151 [34]</i>	16
<i>Abbildung 3.1: Darstellung der methodischen Vorgehensweise .....</i>	22
<i>Abbildung 4.1: Westansicht und Grundriss des Bestandsgebäudes [51] .....</i>	30
<i>Abbildung 4.2: Darstellung des Tragwerksystems des Bestandsgebäudes [46].....</i>	34
<i>Abbildung 4.3: Gebäudemodell des Bestandsgebäudes [46] .....</i>	38
<i>Abbildung 4.4: GWP der Bestandsmassen, unterteilt in Herstellungs-, Abbruch- und Recyclingphase .....</i>	41
<i>Abbildung 4.5: AP der Bestandsmassen, unterteilt in Herstellungs-, Abbruch- und Recyclingphase .....</i>	41
<i>Abbildung 4.6: PERNT der Bestandsmassen, unterteilt in Herstellungs-, Abbruch- und Recyclingphase .....</i>	41
<i>Abbildung 5.1: Darstellung des Tragwerksystems der Variante A [46] .....</i>	43
<i>Abbildung 5.2: Vorbemessung der Geschossdecke: Variante A [55] .....</i>	44
<i>Abbildung 5.3: Anfallende Massen für die Errichtung der Variante A, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling .....</i>	46
<i>Abbildung 5.4: Anfallende Massen am Ende des Lebenszyklus der Variante A, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling.....</i>	47
<i>Abbildung 5.5: GWP der vertikalen Erweiterung auf Bauteilebene - Errichtungszeitpunkt: Variante A .....</i>	48
<i>Abbildung 5.6: GWP der vertikalen Erweiterung auf Bauteilebene - End of Life: Variante A.....</i>	49
<i>Abbildung 5.7: Darstellung des Tragwerksystems der Variante B [46] .....</i>	50
<i>Abbildung 5.8: Anfallende Massen für die Errichtung der Variante B, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling .....</i>	54

*Abbildung 5.9: Anfallende Massen am Ende des Lebenszyklus der Variante B, unterteilt in Herstellung, Abfall und Recycling..... 55*

*Abbildung 5.10: GWP für den ebenen Neubau auf Bauteilebene: Variante B ..... 56*

*Abbildung 5.11: GWP der vertikalen Erweiterung auf Bauteilebene - End of Life: Variante B..... 57*

*Abbildung 5.12: Vergleich der Herstellungsmassen der Variante A und B über den Lebenszyklus..... 58*

*Abbildung 5.13: Vergleich der Abfallmassen der Variante A und B über den Lebenszyklus..... 58*

*Abbildung 5.14: Vergleich der Recyclingmassen der Variante A und B über den Lebenszyklus..... 59*

*Abbildung 5.15: Vergleich des GWP im Zuge der Errichtung (t=0) für Variante A und B ..... 60*

*Abbildung 5.16: Vergleich des GWP am Ende der Lebensdauer (t= 80 Jahre) für Variante A und B ..... 60*

*Abbildung 5.17: Auswertung der VRIs zur Bewertung der Gebäudekonzepte A und B ..... 62*

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1.1: Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen in Niederösterreich 2021 [9]</i>	2
<i>Tabelle 3.1: Produktions- und Flächenbedarf der Variante A und Variante B .....</i>	25
<i>Tabelle 4.1: Querschnittswerte des Bestandstragwerk Abbildungen gemäß [47].....</i>	37
<i>Tabelle 4.2: Tragwerksnachweise des Bestandsgebäudes gemäß EN 1992-1-1 2020 [47] .....</i>	37
<i>Tabelle 4.3: Bauteilaufbauten des Bestandsgebäudes: Abbildungen gemäß [25]....</i>	40
<i>Tabelle 4.4: Recycling- und Abfallpotenzial des Bestandsgebäudes [25].....</i>	40
<i>Tabelle 5.1: GWP, AP und PERNT der vertikalen Erweiterung für die Errichtung sowie am Ende der Lebensdauer: Variante A [26] .....</i>	48
<i>Tabelle 5.2: Querschnittswerte des Tragwerks: Variante B .....</i>	52
<i>Tabelle 5.3: Tragwerksnachweise der Variante B gemäß EN 1992-1-1 2020 [47] ...</i>	52
<i>Tabelle 5.4: GWP, AP und PERNT des ebenen Neubaus für die Errichtung sowie am Ende der Lebensdauer : Variante B [26] .....</i>	56
<i>Tabelle 5.5: Berechnung der Vertical Reuse Indicators der Varianten A und B [49].</i>	61
<i>Tabelle 5.6: Gesamtergebnisse der Vergleichsstudie zwischen Variante A und B...</i>	63

## Anhang

Im Anhang werden die Materialdaten, die Ergebnisse der Gebäudemassen sowie die Ergebnisse der Ökobilanzierung dargestellt. Darüber hinaus werden die statischen Berechnungen, die vollumfassende Ökobilanzierung sowie die digitalen Gebäudemodelle am Institut für Hochbau- und Industriebau der Technischen Universität Wien archiviert und stehen dort für künftige Forschungsarbeiten zur Verfügung.

## Anhang 1 Materialdaten

Input-Material	Dichte	Herstellung (A1-A3)			Abfall (C1-C4)			Recycling (D)			Entsorgung	Lebensdauer
		kg CO <sub>2</sub> eq.	kg So <sub>4</sub> /Funkt. Einh.	MJ/Funkt. Einh.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg So <sub>4</sub> /Funkt. Einh.	MJ/Funkt. Einh.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg So <sub>4</sub> /Funkt. Einh.	MJ/Funkt. Einh.		
Blech	7850	2,9827	0,0063	28,2020	0,0036	0,0000	0,0491	-0,1146	-0,0038	0,0027	2	50
PU-Schaum	29	2,7471	0,0006	75,4023	2,2253	0,0013	27,0229	-0,9052	-0,0001	27,0229	5	35
Gewalztes Stahlprofil	7874	2,6760	0,0058	25,6900	0,0009	0,0000	0,0121	-1,3890	-0,0054	34,4924	2	50
Stahlbeton	2427	0,1740	0,0040	0,9942	0,0109	0,0001	0,1694	-0,0020	0,0000	-0,0271	2	100
Wärmedämmung XPS	32,7	0,1295	0,0163	24,0520	3,4339	0,0006	1,5785	-0,0302	-0,0001	-0,5119	4	50
Bituminöse Abdichtung	1145	0,5404	0,0017	41,6594	0,0038	0,0000	0,0510	0,0866	0,0002	1,3594	3	35
Kalkputz	1800	0,2196	0,0001	1,4156	0,0209	0,0001	0,2717	0,0000	0,0000	0,0000	2	50
Gipsputz	900	0,1400	0,0002	2,1200	0,0161	0,0001	0,2161	0,0000	0,0000	0,0000	4	50
Stahlbetonsohle	2427	0,1740	0,0040	0,9942	0,0109	0,0001	0,1694	-0,0020	0,0000	-0,0271	2	100
Wärmedämmung XPS	32,7	0,1295	0,0163	24,0520	3,4339	0,0006	1,5785	-0,0302	-0,0001	-0,5119	4	50
Dampfsperre	1145	0,5404	0,0017	41,6594	0,0038	0,0000	0,0510	0,0866	0,0002	1,3594	3	35
EPS Dämmung	25	3,4772	0,0047	91,4400	3,6959	0,0005	4,5746	-1,3828	-0,0014	-19,3400	4	35
EPS Dämmung	25	3,4772	0,0047	91,4400	3,6959	0,0005	4,5746	-1,3828	-0,0014	-19,3400	4	35
Dampfbremse	930	2,4140	0,0314	70,0000	2,9902	0,0005	4,2679	-1,3188	-0,0013	-18,4409	3	25
Trapezblech	7850	2,9827	0,0063	28,2020	0,0036	0,0000	0,0491	-0,1146	-0,0038	0,0027	2	50
CW-Profil DZW. MW-W	24	1,4371	0,0121	23,2750	0,0662	0,0001	0,2406	-0,0623	-0,0001	-1,0542	4	50
Folie	930	2,4140	0,0314	70,0000	2,9902	0,0005	4,2679	-1,3188	-0,0013	-18,4409	3	35
Sauberkeitsschicht	2286	0,0636	0,0001	0,3922	0,0096	0,0001	0,1395	-0,0041	0,0000	-0,0519	2	100
HLZ 25	575	0,2405	0,0002	2,2522	-0,0108	0,0001	0,1423	-0,0122	0,0000	-0,1784	2	50
Kunststoffabdichtung	950	1,7263	0,0053	64,8947	0,1598	0,0018	1,3453	-2,0684	-0,0065	-0,7211	3	35
	kg/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg So <sub>4</sub> /Funkt. Einh.	MJ/Funkt. Einh.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg So <sub>4</sub> /Funkt. Einh.	MJ/Funkt. Einh.	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg So <sub>4</sub> /Funkt. Einh.	MJ/Funkt. Einh.	Entsorgung	Lebensdauer
Fenster	38,82	2,3331	0,0013	40,7779	0,1284	0,0001	0,3565	-0,7239	-0,0031	-13,1891	3	35
Dachfenster	35,2	1,2983	0,0014	59,0909	1,2165	0,0008	1,7506	-1,0540	-0,0025	-18,0966	3	35
Sektionaltor	30,4	2,4217	0,0056	31,4967	0,1327	0,0001	8,4868	-1,3862	-0,0030	-15,6546	3	35
Brandschutztor	57,9	1,1105	0,0038	6,1831	0,4947	0,0002	0,2869	-1,0069	-0,0019	-11,3126	3	35
Stahltüren	38,44	2,2555	0,0060	24,9480	-0,2292	-0,0005	-1,9334	-1,1082	-0,0023	-10,6920	3	35

## Anhang 2 Bestandsgebäude

## Anhang 2.1: Gebäudemassen Bestand

Bauteilmassen	Gesamt
BT1: Iso- Außenwandpaneel	175.180,86
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	86.654,61
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	37.345,57
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	742,02
BT5: Hallenboden	1.000.338,89
BT6: Abgehängte Decke	4.624,34
BT7: Warmdach	126.933,34
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	555.710,19
BT9: Vordach Innenhof	26.641,53
BT10: Fenster- und Türelemente	6.419,48
BT11: Tor- und Türelemente	371,57
Gebäudemasse [t]	<b>2.020,96</b>
Recycling	Recycling
BT1: Iso- Außenwandpaneel	2.793,26
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	43.142,35
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	16.145,64
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	-
BT5: Hallenboden	491.858,41
BT6: Abgehängte Decke	1.182,45
BT7: Warmdach	55.866,40
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	277.855,10
BT9: Vordach Innenhof	13.186,15
BT10: Fenster- und Türelemente	554,40
BT11: Tor- und Türelemente	92,89
Recyclingmassen [t]	<b>902,68</b>
Abfall	Abfall
BT1: Iso- Außenwandpaneel	173.530,67
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	43.512,25
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	21.199,93
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	742,02
BT5: Hallenboden	508.480,48
BT6: Abgehängte Decke	3.441,90
BT7: Warmdach	71.066,93
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	277.855,10
BT9: Vordach Innenhof	13.522,68
BT10: Fenster- und Türelemente	5.865,08
BT11: Tor- und Türelemente	278,68
Abfallmassen [t]	<b>1.119,22</b>

## Anhang 2.2 Ökobilanz Bestand

Bauteile	Herstellung (A1-A3)		
	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	564,59	1,07	5.142,23
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	15,07	0,35	94,68
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	8,47	0,01	83,44
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	0,20	0,00	3,09
BT5: Hallenboden	181,43	3,67	1.833,70
BT6: Abgehängte Decke	7,37	0,02	71,48
BT7: Warmdach	36,17	0,07	1.332,70
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	71,69	1,64	409,56
BT9: Vordach Innenhof	62,91	0,13	596,38
BT10: Fenster- und Türelemente	9,26	0,01	161,85
BT11: Tor- und Türelemente	0,90	0,79	0,00
<b>Summe</b>	<b>958,06</b>	<b>7,76</b>	<b>9.729,12</b>
Bauteile	Abfall (C1-C4)		
	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	13,32	0,01	162,58
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	1,74	0,00	7,89
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	- 0,09	0,00	3,39
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	0,02	0,00	0,16
BT5: Hallenboden	56,86	0,04	139,93
BT6: Abgehängte Decke	0,04	0,00	0,55
BT7: Warmdach	27,22	0,01	36,27
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	2,24	0,01	34,89
BT9: Vordach Innenhof	0,03	0,00	0,45
BT10: Fenster- und Türelemente	0,51	0,00	1,42
BT11: Tor- und Türelemente	7,62	0,03	0,00
<b>Summe</b>	<b>109,51</b>	<b>0,10</b>	<b>387,53</b>
Bauteile	Recycling (D)		
	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	- 3,88	- 0,02	96,35
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	- 0,09	- 0,00	- 1,17
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	- 0,20	- 0,00	- 2,88
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	-	-	-
BT5: Hallenboden	- 1,19	- 0,00	- 15,57
BT6: Abgehängte Decke	- 0,14	- 0,00	0,00
BT7: Warmdach	- 14,21	- 0,02	- 126,01
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	- 0,42	- 0,00	- 5,58
BT9: Vordach Innenhof	- 3,86	- 0,04	71,13
BT10: Fenster- und Türelemente	-	-	-
BT11: Tor- und Türelemente	0,64	- 0,11	- 0,00
<b>Summe</b>	<b>- 23,34</b>	<b>- 0,21</b>	<b>16,27</b>

## Anhang 3 Vergleichsanalyse

## Anhang 3.1 Gesamtmassen Variante A: Vertikale Erweiterung

Herstellung (A1-A3)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	Gesamt
BT1: Iso- Außenwandpaneel	170.601,44	-	-	-	310.746,13	-	-	310.746,13	-	792.093,71
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	17.330,92	-	-	-	-	-	-	-	-	17.330,92
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	57.738,63	-	-	-	-	57.738,63	-	-	-	115.477,25
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	1.824,00	-	-	-	-	1.824,00	-	-	-	3.648,00
BT5: Hallenboden	975.306,97	-	-	-	-	-	-	-	-	975.306,97
BT6: Abgehängte Decke	9.621,00	-	-	-	-	9.621,00	-	-	-	19.241,99
BT7: Warmdach	123.757,03	-	-	-	22.549,33	123.757,03	-	22.549,33	-	292.612,72
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	149.034,79	-	-	-	-	-	-	-	-	149.034,79
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	980.288,30	-	-	-	-	-	-	-	-	980.288,30
BT10: Vordach Innenhof	-	-	-	-	-	26.641,53	-	-	-	26.641,53
BT11: Fenster- und Türelemente	9.648,87	-	-	-	11.565,42	-	-	11.565,42	-	32.779,70
BT12: Tor- und Türelemente	1.566,81	-	-	-	4.450,92	-	-	4.450,92	-	10.468,65
Anfallende Massen pro Jahrzehnt [t]	<b>2.496,72</b>	-	-	-	<b>349,31</b>	<b>219,58</b>	-	<b>349,31</b>	-	<b>3.414,92</b>
Anfallende Massen kumuliert[t]	<b>2.496,72</b>	<b>2.496,72</b>	<b>2.496,72</b>	<b>2.496,72</b>	<b>2.846,03</b>	<b>3.065,61</b>	<b>3.065,61</b>	<b>3.414,92</b>	<b>3.414,92</b>	<b>3.414,92</b>

Recycling (D)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	Recycling
BT1: Iso- Außenwandpaneel	558,65	-	-	-	4.954,85	-	-	4.954,85	4.954,85	10.468,36
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	8.628,47	-	-	-	-	-	-	-	43.142,35	51.770,82
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	16.145,64	-	-	-	-	24.962,19	-	-	24.962,19	66.070,02
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BT5: Hallenboden	491.858,41	-	-	-	-	-	-	-	479.550,42	971.408,84
BT6: Abgehängte Decke	1.182,45	-	-	-	-	2.460,09	-	-	2.460,09	6.102,63
BT7: Warmdach	55.866,40	-	-	-	3.252,18	53.856,03	-	3.252,18	53.856,03	170.082,83
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	27.785,51	-	-	-	-	-	-	-	324.586,98	352.372,49
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	-	-	-	-	-	-	-	-	490.144,15	490.144,15
BT10: Vordach Innenhof	-	-	-	-	-	13.186,15	-	-	13.186,15	26.372,31
BT11: Fenster- und Türelemente	365,90	-	-	-	2.891,35	-	-	2.891,35	2.891,35	8.674,06
BT12: Tor- und Türelemente	61,31	-	-	-	1.112,73	-	-	1.112,73	1.112,73	3.399,50
Anfallende Massen pro Jahrzehnt [t]	<b>602,45</b>	-	-	-	<b>12,21</b>	<b>94,46</b>	-	<b>12,21</b>	<b>1.440,85</b>	<b>2.156,87</b>
Anfallende Massen kumuliert[t]	<b>602,45</b>	<b>602,45</b>	<b>602,45</b>	<b>602,45</b>	<b>614,66</b>	<b>709,13</b>	<b>709,13</b>	<b>721,34</b>	<b>2.162,19</b>	<b>2.162,19</b>

Abfall (C1-C4)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	Abfall
BT1: Iso- Außenwandpaneel	34.706,13	-	-	-	307.818,92	-	-	307.818,92	307.818,92	958.162,90
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	8.702,45	-	-	-	-	-	-	-	43.512,25	52.214,71
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	21.199,93	-	-	-	-	32.776,44	-	-	32.776,44	86.752,80
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	742,02	-	-	-	-	1.824,00	-	-	1.824,00	4.390,02
BT5: Hallenboden	508.480,48	-	-	-	-	-	-	-	495.756,55	1.004.237,03
BT6: Abgehängte Decke	3.441,90	-	-	-	-	7.160,90	-	-	7.160,90	17.763,70
BT7: Warmdach	71.066,93	-	-	-	19.297,15	69.901,00	-	19.297,15	69.901,00	249.463,22
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	27.785,51	-	-	-	-	-	-	-	324.586,98	352.372,49
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	-	-	-	-	-	-	-	-	490.144,15	490.144,15
BT10: Vordach Innenhof	-	-	-	-	-	13.522,68	-	-	13.522,68	27.045,36
BT11: Fenster- und Türelemente	183,93	-	-	-	8.674,06	-	-	8.674,06	8.674,06	26.206,12
BT12: Tor- und Türelemente	738,68	-	-	-	3.338,19	-	-	3.338,19	3.338,19	10.753,25
Anfallende Massen pro Jahrzehnt [t]	<b>677,05</b>	-	-	-	<b>339,13</b>	<b>125,19</b>	-	<b>339,13</b>	<b>1.799,02</b>	<b>3.279,51</b>
Anfallende Massen kumuliert[t]	<b>677,05</b>	<b>677,05</b>	<b>677,05</b>	<b>677,05</b>	<b>1.016,18</b>	<b>1.141,36</b>	<b>1.141,36</b>	<b>1.480,49</b>	<b>3.279,51</b>	<b>3.279,51</b>

## Anhang 3.2 Ökobilanz Variante A: Vertikale Erweiterung

Bauteile	Errichtungsphase								
	Herstellung (A1-A3)			Abfall (C1-C4)			Recycling (D)		
	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	506,14	1,04	5.007,81	2,66	0,00	32,52	- 0,78	- 0,00	19,27
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	3,01	0,07	18,94	0,35	0,00	1,58	- 0,02	- 0,00	- 0,23
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	13,10	0,01	129,00	- 0,09	0,00	3,39	- 0,20	- 0,00	- 2,88
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	0,29	0,00	4,37	0,02	0,00	0,16	-	-	-
BT5: Hallenboden	176,89	3,58	1.787,82	56,86	0,04	139,93	- 1,19	- 0,00	- 15,57
BT6: Abgehängte Decke	15,33	0,03	148,72	0,04	0,00	0,55	- 0,14	- 0,00	0,00
BT7: Warmdach	35,27	0,07	1.299,35	27,22	0,01	36,27	- 14,21	- 0,02	- 126,01
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	24,57	2,45	611,36	0,22	0,00	3,49	- 0,04	- 0,00	- 0,56
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	224,59	3,94	1.507,44	-	-	-	-	-	-
BT10: Vordach Innenhof	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BT11: Fenster- und Türelemente	3,76	0,00	65,76	0,10	0,00	0,28	-	-	0,28
BT12: Tor- und Türelemente	2,51	0,01	29,72	4,56	0,02	0,00	0,41	- 0,07	0,00
<b>Summe</b>	<b>1.005,46</b>	<b>11,21</b>	<b>10.610,29</b>	<b>91,94</b>	<b>0,07</b>	<b>218,16</b>	<b>- 16,16</b>	<b>- 0,10</b>	<b>- 125,70</b>

Bauteile	End of Life								
	Herstellung (A1-A3)			Abfall (C1-C4)			Recycling (D)		
	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	2.349,97	4,85	23.250,99	49,93	0,03	609,30	- 14,54	- 0,06	361,08
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	18,08	0,42	113,62	2,09	0,00	9,47	- 0,11	0,00	1,40
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	26,20	0,02	258,01	- 0,38	0,01	13,87	- 0,81	- 0,00	- 11,79
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	0,57	0,00	8,75	0,05	0,00	0,56	-	-	-
BT5: Hallenboden	176,89	3,58	1.787,82	112,29	0,07	276,36	- 2,35	- 0,01	- 30,76
BT6: Abgehängte Decke	30,67	0,06	297,45	0,21	0,00	2,82	- 0,70	- 0,02	0,02
BT7: Warmdach	146,86	0,34	5.365,27	112,49	0,03	152,50	- 14,23	- 0,02	- 125,02
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	24,57	2,45	611,36	3,57	0,02	55,58	- 0,04	- 0,00	0,56
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	224,59	3,94	1.507,44	5,23	0,03	81,34	- 15,96	- 0,06	359,10
BT10: Vordach Innenhof	62,91	0,13	596,38	0,07	0,00	0,90	- 7,72	- 0,09	142,26
BT11: Fenster- und Türelemente	12,78	0,01	223,39	0,66	0,00	1,83	- 1,05	- 0,00	- 18,84
BT12: Tor- und Türelemente	16,74	0,04	198,60	5,09	0,02	30,33	- 2,64	- 0,07	- 32,99
<b>Summe</b>	<b>3.090,8256</b>	<b>15,8512</b>	<b>34.219,071</b>	<b>291,2980</b>	<b>0,2105</b>	<b>1.234,8545</b>	<b>- 60,1353</b>	<b>- 0,3393</b>	<b>641,1071</b>

## Anhang 3.3 Gesamtmassen Variante B: Ebener Neubau

Herstellung (A1-A3)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	Gesamt
BT1: Iso- Außenwandpaneel	170.601,44	-	-	-	310.746,13	-	-	310.746,13	-	792.093,71
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	17.330,92	-	-	-	-	-	-	-	-	17.330,92
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	57.738,63	-	-	-	-	57.738,63	-	-	-	115.477,25
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	1.824,00	-	-	-	-	1.824,00	-	-	-	3.648,00
BT5: Hallenboden	975.306,97	-	-	-	-	-	-	-	-	975.306,97
BT6: Abgehängte Decke	9.621,00	-	-	-	-	9.621,00	-	-	-	19.241,99
BT7: Warmdach	123.757,03	-	-	-	22.549,33	123.757,03	-	22.549,33	-	292.612,72
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	149.034,79	-	-	-	-	-	-	-	-	149.034,79
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	980.288,30	-	-	-	-	-	-	-	-	980.288,30
BT10: Vordach Innenhof	-	-	-	-	-	26.641,53	-	-	-	26.641,53
BT11: Fenster- und Türelemente	9.648,87	-	-	-	11.565,42	-	-	11.565,42	-	32.779,70
BT12: Tor- und Türelemente	1.566,81	-	-	-	4.450,92	-	-	4.450,92	-	10.468,65
Anfallende Massen pro Jahrzehnt [t]	<b>2.496,72</b>	-	-	-	<b>349,31</b>	<b>219,58</b>	-	<b>349,31</b>	-	<b>3.414,92</b>
Anfallende Massen kumuliert[t]	<b>2.496,72</b>	<b>2.496,72</b>	<b>2.496,72</b>	<b>2.496,72</b>	<b>2.846,03</b>	<b>3.065,61</b>	<b>3.065,61</b>	<b>3.414,92</b>	<b>3.414,92</b>	<b>3.414,92</b>

Recycling (D)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	Recycling
BT1: Iso- Außenwandpaneel	558,65	-	-	-	4.954,85	-	-	4.954,85	4.954,85	10.468,36
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	8.628,47	-	-	-	-	-	-	-	43.142,35	51.770,82
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	16.145,64	-	-	-	-	24.962,19	-	-	24.962,19	66.070,02
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BT5: Hallenboden	491.858,41	-	-	-	-	-	-	-	479.550,42	971.408,84
BT6: Abgehängte Decke	1.182,45	-	-	-	-	2.460,09	-	-	2.460,09	6.102,63
BT7: Warmdach	55.866,40	-	-	-	3.252,18	53.856,03	-	3.252,18	53.856,03	170.082,83
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	27.785,51	-	-	-	-	-	-	-	324.586,98	352.372,49
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	-	-	-	-	-	-	-	-	490.144,15	490.144,15
BT10: Vordach Innenhof	-	-	-	-	-	13.186,15	-	-	13.186,15	26.372,31
BT11: Fenster- und Türelemente	365,90	-	-	-	2.891,35	-	-	2.891,35	2.891,35	8.674,06
BT12: Tor- und Türelemente	61,31	-	-	-	1.112,73	-	-	1.112,73	1.112,73	3.399,50
Anfallende Massen pro Jahrzehnt [t]	<b>602,45</b>	-	-	-	<b>12,21</b>	<b>94,46</b>	-	<b>12,21</b>	<b>1.440,85</b>	<b>2.156,87</b>
Anfallende Massen kumuliert[t]	<b>602,45</b>	<b>602,45</b>	<b>602,45</b>	<b>602,45</b>	<b>614,66</b>	<b>709,13</b>	<b>709,13</b>	<b>721,34</b>	<b>2.162,19</b>	<b>2.162,19</b>

Abfall (C1-C4)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	Abfall
BT1: Iso- Außenwandpaneel	34.706,13	-	-	-	307.818,92	-	-	307.818,92	307.818,92	958.162,90
BT2: Stahlbeton- Sockelelement (Frostschürze)	8.702,45	-	-	-	-	-	-	-	43.512,25	52.214,71
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	21.199,93	-	-	-	-	32.776,44	-	-	32.776,44	86.752,80
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	742,02	-	-	-	-	1.824,00	-	-	1.824,00	4.390,02
BT5: Hallenboden	508.480,48	-	-	-	-	-	-	-	495.756,55	1.004.237,03
BT6: Abgehängte Decke	3.441,90	-	-	-	-	7.160,90	-	-	7.160,90	17.763,70
BT7: Warmdach	71.066,93	-	-	-	19.297,15	69.901,00	-	19.297,15	69.901,00	249.463,22
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	27.785,51	-	-	-	-	-	-	-	324.586,98	352.372,49
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	-	-	-	-	-	-	-	-	490.144,15	490.144,15
BT10: Vordach Innenhof	-	-	-	-	-	13.522,68	-	-	13.522,68	27.045,36
BT11: Fenster- und Türelemente	183,93	-	-	-	8.674,06	-	-	8.674,06	8.674,06	26.206,12
BT12: Tor- und Türelemente	738,68	-	-	-	3.338,19	-	-	3.338,19	3.338,19	10.753,25
Anfallende Massen pro Jahrzehnt [t]	<b>677,05</b>	-	-	-	<b>339,13</b>	<b>125,19</b>	-	<b>339,13</b>	<b>1.799,02</b>	<b>3.279,51</b>
Anfallende Massen kumuliert[t]	<b>677,05</b>	<b>677,05</b>	<b>677,05</b>	<b>677,05</b>	<b>1.016,18</b>	<b>1.141,36</b>	<b>1.141,36</b>	<b>1.480,49</b>	<b>3.279,51</b>	<b>3.279,51</b>

## Anhang 3.4 Ökobilanz Variante B: ebener Neubau

Bauteile	Errichtungsphase								
	Herstellung (A1-A3)			Abfall (C1-C4)			Recycling (D)		
	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	607,32	1,25	6.008,94	13,32	0,01	162,58	- 3,88	- 0,02	96,35
BT2: Stahlbeton- Socketelement (Frostschürze)	18,27	0,42	114,80	1,74	0,00	7,89	- 0,09	- 0,00	- 1,17
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	23,94	0,02	235,69	- 0,09	0,00	3,39	- 0,20	- 0,00	- 2,88
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	2,72	0,01	42,64	0,02	0,00	0,16	-	-	-
BT5: Hallenboden	372,80	7,55	3.767,82	56,86	0,04	139,93	- 1,19	- 0,00	- 15,57
BT6: Abgehängte Decke	15,47	0,03	150,08	0,04	0,00	0,55	- 0,14	- 0,00	0,00
BT7: Warmdach	74,33	0,14	2.738,38	27,22	0,01	36,27	- 14,21	- 0,02	- 126,01
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	145,84	3,34	833,11	2,24	0,01	34,89	- 0,42	- 0,00	- 5,58
BT9: Geschossdecke	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BT10: Vordach Innenhof	62,91	0,13	596,38	0,03	0,00	0,45	- 3,86	- 0,04	71,13
BT10: Fenster- und Türelemente	17,91	0,01	566,69	0,51	0,00	1,42	-	-	-
BT11: Tor- und Türelemente	8,54	0,02	107,36	7,62	0,03	0,00	0,64	- 0,11	- 0,00
<b>Summe</b>	<b>1.350,03</b>	<b>12,94</b>	<b>15.161,90</b>	<b>109,51</b>	<b>0,10</b>	<b>387,53</b>	<b>- 23,34</b>	<b>- 0,21</b>	<b>16,27</b>

Bauteile	End of Life								
	Herstellung (A1-A3)			Abfall (C1-C4)			Recycling (D)		
	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]	GWP(100) [t CO2 eq.]	AP [t SO2 eq.]	PERNT [GJ]
BT1: Iso- Außenwandpaneel	1.821,96	3,76	18.026,83	44,46	0,03	542,54	- 12,95	- 0,05	321,52
BT2: Stahlbeton- Socketelement (Frostschürze)	18,27	0,42	114,80	3,85	0,01	17,46	- 0,19	- 0,00	- 2,59
BT3: IW 25cm Mauerwerk HLZ	47,87	0,04	471,39	- 0,61	0,01	22,54	- 1,31	- 0,00	- 19,16
BT4: LB 12,5cm Metallständerwand	5,43	0,03	85,28	0,23	0,00	2,40	-	-	-
BT5: Hallenboden	372,80	7,55	3.767,82	173,69	0,11	427,45	- 3,63	- 0,01	- 47,57
BT6: Abgehängte Decke	30,95	0,06	300,16	0,21	0,00	2,84	- 0,70	- 0,02	0,02
BT7: Warmdach	171,92	0,37	6.195,62	206,31	0,05	276,02	- 22,26	- 0,05	- 126,72
BT8: Stahlbeton Fertigteile (Tragwerk)	145,84	3,34	833,11	6,81	0,03	105,87	- 1,27	- 0,00	- 16,93
BT9: Geschossdecke (Hohldiele)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BT10: Vordach Innenhof	125,81	0,27	1.192,76	0,10	0,00	1,35	- 11,58	- 0,13	213,40
BT11: Fenster- und Türelemente	53,73	0,04	1.700,08	20,68	0,01	31,91	- 7,57	- 0,02	- 132,16
BT12: Tor- und Türelemente	25,62	0,06	322,08	8,01	0,03	48,70	- 2,91	- 0,12	- 38,94
<b>Summe</b>	<b>2.820,1978</b>	<b>15,9488</b>	<b>33.009,93</b>	<b>463,7368</b>	<b>0,2922</b>	<b>1.479,0977</b>	<b>- 64,3875</b>	<b>- 0,4148</b>	<b>150,8624</b>